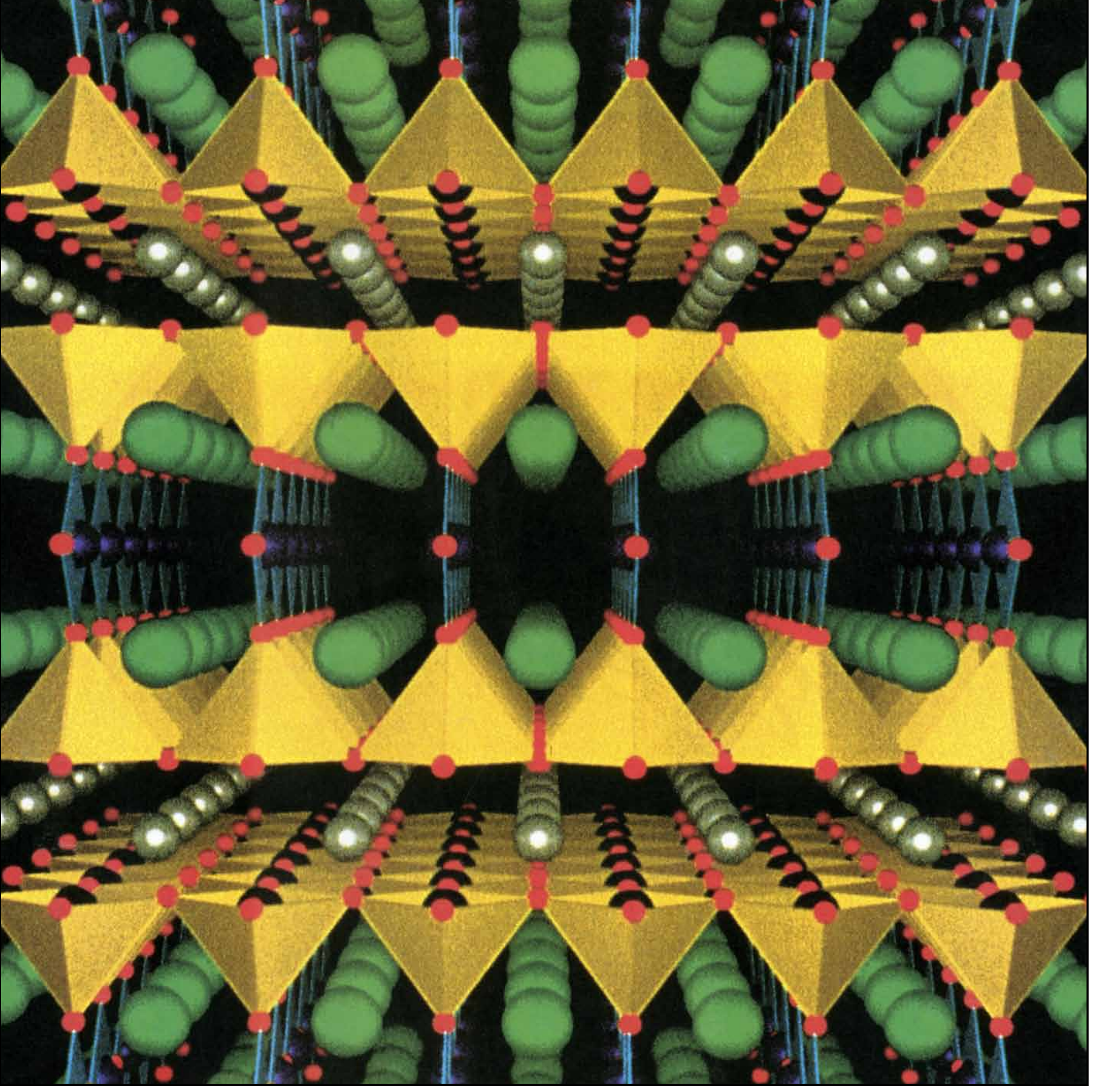
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



PEROVSKITAS

Agosto 1988
450 PTAS.

Los espacios en gris
correspondan a publicidad
en la edición impresa

Apuntes

El CERN se mueve. De aquí a cuatro años habrá cancelado 200 puestos de trabajo, además de las bajas por jubilación o expiración de contrato. Para 1993 habrá reducido su cuadro investigador en un 10 por ciento hasta dejarlo en 3000 expertos, lo que le supondrá un ahorro de unos 14.000 millones de pesetas. Así podrá rejuvenecerse con la incorporación anual prevista de 50 físicos recién graduados. La media de edad de sus componentes se cifra hoy en 48 años.

El gobierno británico está decidido a transferir institutos de investigación al sector privado. El primero que se ha puesto en venta es el National Engineering Laboratory, instalado en la localidad escocesa de East Kilbride, que lleva 40 años de operación en distintos campos de investigación de punta: reactivos biológicos, ingeniería marina y energía eólica. Cuenta con un presupuesto anual de 21 millones de libras esterlinas, 16 de los cuales los recibe por asignación directa del erario público.

Mientras los debates políticos retrasan la preparación de una vacuna contra la lepra en la India, el país acaba de sufrir un nuevo brote de leishmaniasis, con 160 muertos y unos 22.000 afectados en los últimos 12 meses. El protozoo causante de la enfermedad perdió su vector natural con la propagación del DDT. Tras la prohibición del uso del insecticida, se ha recuperado la población del portador.

Fuera de nuestros pagos no es infrecuente que los científicos echen su cuarto a espadas en la solución de problemas que exigen familiaridad con la lectura de los clásicos. Esta vez la cuestión resulta, hasta cierto punto, más reciente. Cuando Bernouilli leyó la respuesta anónima que Newton había dado del braquistocrono, que él propusiera como reto a la comunidad científica de su tiempo, admitió que el autor no podía ser otro, pues se le reconocía *tamquam ex ungue leonem* (''como por la garra al león''). ¿De quién tomó Bernouilli la frase clásica? De Alceo, según parece.

Los ordenadores han puesto al servicio de los biólogos más datos de los que pueden asimilar y elaborar. Ciñéndonos al recuento de nucleótidos de ADN, contamos ya con más de 20 millones de ellos pertenecientes a la secuenciación de centenares de organismos, cifra que continúa creciendo exponencialmente y que ha de abarcar el genoma humano. La manipulación de los datos, y su exacta interpretación, demanda un nuevo profesional, con buena formación en matemática, química teórica y biología molecular.

Port Said se hunde. En realidad podrían quedar bajo las aguas del Mediterráneo, hacia el 2100, una cincuentena de kilómetros de la cuenca nororiental del delta del Nilo. Ese fenómeno de subsidencia, que comenzó hace 7500 años, se ha visto agravado con la construcción de la presa de Asuán, que ha mermado los sedimentos aportados por el río.

El Ariane-4, que puso en órbita el pasado junio tres satélites artificiales, operó, tras semanas de dilación y remiendos de última hora, sin mayor contratiempo. También ha superado felizmente una prueba de combustión el nuevo cohete impulsor de la lanzadera espacial. Si el par de ensayos pendientes se resuelven favorablemente, se reanudará a finales de este mes de agosto el programa de la lanzadera.

La empresa famarcéutica Ciba-Geigy AG acaba de anunciar su proyecto de abordar muy pronto los ensayos de una vacuna potencial contra el virus del SIDA. Dicha vacuna emplea parte de la cápside proteica del virus. Antes de aplicarla al hombre, la compañía suiza ha ensayado con distintas especies que han manifestado una rotunda respuesta inmunitaria.

Se ha preparado una vacuna contra la malaria del ratón que le protege de las infecciones del parásito portador. Los investigadores han escogido como caballo de Troya una bacteria sin relación con el proceso infestante, una vez debidamente atenuada: *Salmonella typhymurium*. El éxito obtenido con la misma permite abrigar la esperanza de que se logren vacunas orales contra la malaria humana y otras enfermedades, verbigracia, contra la lepra, leishmaniasis, esquistosomiasis, SIDA, etcétera.


Agosto de 1988 Número 143

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

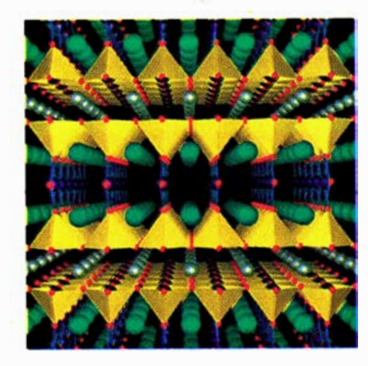
Mireia Bofill: *El crecimiento económico de Estados Unidos*; Ramón Pascual: *Los aceleradores de partículas, banco de pruebas de la teoría cosmológica*; Juan Pedro Adrados: *Perovskitas*; Esteban Santiago: *Las bacterias, organismos pluricelulares*; Manuel Puigcerver: *Polynyas en el océano Glacial Antártico*; Juan Luis Serra: *Neurobiología de la alimentación de las sanguijuelas*; Jaime Alvar: *Metalurgia temprana de hierro en Africa Central*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Luis Alonso, Mariano Artigas, José L. Sánchez y F. J. de la Rubia

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
11	The Bettmann Archive (*arriba*), Ford Motor Company (*abajo*)
12-13	Jerome Kuhl
14	General Electric Company
16-18	Jerome Kuhl
21-32	J. León, I. Guerrero, Angel Pellicer y Maria Rieradevall
35-40	Andrew Christie
47	Quesada/Burke
48-50	George V. Kelvin, Science Graphics
51	Robert M. Hazen (*arriba*); Ross J. Angel, Laboratorio Geofísico, Institución Carnegie de Washington (*abajo*)
52	Robert M. Hazen
53	George V. Kelvin, Science Graphics
57	Hans Reichenbach
58	James A. Shapiro
59	Jeffrey C. Burnham, Susan A. Collart y Barbara W. Highison (*arriba*), Gabriela M. Vasquez, Frank Qualls y David White (*abajo*)
60	James A. Shapiro
61	James A. Shapiro (*arriba*), S. A. Sturdza
62	James A. Shapiro
63	Martin Dworkin
27	Josefino C. Comiso, Centro Goddard de Vuelo Espacial de la National Aeronautics and Space Administration
68	Ioan Worpole
69-72	Josefino C. Comiso, Centro Goddard de Vuelo Espacial de la National Aeronautics and Space Administration
75	Por cortesía de la Academia norteamericana de Cinematografía
76	Tom Prentiss
77	Tom Prentiss (*arriba y abajo*), Charles M. Lent (*centro*)
78	Charles M. Lent
79	Tom Prentiss
83	Real Museo de Africa Central, Tervuren, Bélgica
84	Michael Goodman
85	Francis Van Noten (*arriba*), Michael Goodman (*abajo*)
86	Francis Van Noten
88-89	Michael Goodman
92-94	Andrew Christie
97-99	Michael Goodman



LA PORTADA muestra un modelo generado por ordenador del superconductor de alta temperatura "1-2-3" que, como otros superconductores de alta temperatura recién descubiertos, pertenece a la familia cristalográfica de las perovskitas (véase "Perovskitas", por Robert M. Hazen, en este mismo número). El compuesto consta de átomos de itrio (*gris*), bario (*verde*) y cobre (*azul*) en la relación 1 : 2 : 3, además de oxígeno (*rojo*). La imagen se realizó con el programa WINSOM, desarrollado por la compañía IBM.

Fotografía por cortesía de la compañía IBM

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Carlos Oppenheimer, Josep Maria Farré Josa
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)

SCIENTIFIC AMERICAN

DIRECTOR EDITORIAL Jonathan Piel
REDACCIÓN Armand Schwab, Jr. (Subdirector), Timothy Appenzeller, Timothy M. Beardsley, John M. Benditt, Laurie Burnham, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell, John Horgan, June Kinoshita, Ricki L. Rusting, Karen Wright
DIRECTOR ARTÍSTICO Samuel L. Howard
DIRECTOR DE PRODUCCIÓN Richard Sasso
PRESIDENTE HONORARIO Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	4950	9000
Extranjero	5500	10.000

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 450 pesetas
Extraordinario: 575 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X   Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S. A. Buenos Aires, 51 - 08902 Hospitalet (Barcelona)

Gráfica Elzeviriana, S. A. Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11 - 08013 Barcelona

Printed in Spain - Impreso en España

Hace…

José M.ª López Piñero

…cien años

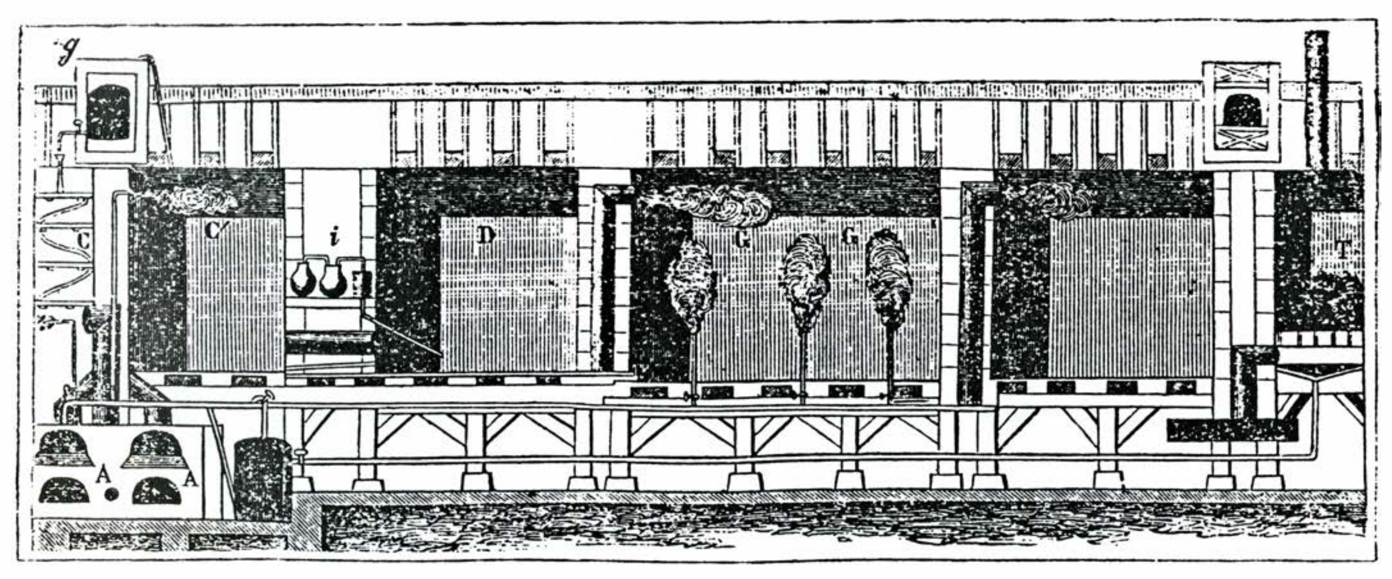
Falleció Antonio Casares Rodríguez, uno de los principales químicos de las llamadas “generaciones intermedias”, cuyo esfuerzo en las décadas centrales del siglo XIX permitió la recuperación posterior de la actividad científica española.

Nacido en la localidad lucense de Monforte en 1812, Casares cursó los estudios de farmacia y de ciencias, obteniendo los correspondientes doctorados en 1832 y 1841. Fue nombrado en 1845 titular de la cátedra de química de la Universidad de Santiago, adscrita a la Facultad de Filosofía hasta que doce años después se fundó la Facultad de Ciencias. Casares llegó a ser decano de esta última y en 1859 pasó a ocupar la cátedra de química inorgánica de la Facultad de Farmacia de la misma Universidad, en la que desarrolló toda su actividad científica.

Igual que la de otras muchas figuras “intermedias”, la contribución de Casares consistió, por una parte, en mantener al día la información acerca de los avances que en este período crucial experimentó su disciplina y, por otra, en recuperar y difundir las técnicas de laboratorio, principalmente aplicadas a cuestiones prácticas.

Tradujo algunas obras extranjeras, entre ellas, el tratado de farmacia de Eugène Soubeiran, que adaptó y complementó con materiales propios, según era costumbre en la España de la época. Sin embargo, su principal campo de interés fue la aplicación de la química a la agricultura, tema al que dedicó su *Manual de química general, con aplicaciones a la industria, y con especialidad a la agricultura*. La primera edición, basada en las obras químicas de Berzelius, Liebig, Dumas y Regnault, así como en las agronómicas de Jean Baptiste Boussingault, apareció en 1857 y fue ampliamente difundida por la red de librerías que el editor Angel Calleja tenía en España y Sudamérica. (Los cuatro grabados que se reproducen aquí están tomados de esta primera edición.) Por su enfoque claro y riguroso se convirtió en un texto de prestigio que tuvo nuevas ediciones en 1867, 1873 y 1880, en cada una de las cuales Casares cuidó de incluir “todos los adelantos y descubrimientos importantes hechos en el tiempo transcurrido desde la anterior”, así como de renovar los fundamentos doctrinales. Como muestra de su contenido reproduciremos un fragmento del capítulo dedicado a la procedencia y composición de las tierras de labor, en la edición de 1857: “Los terrenos que se destinan al cultivo de las plantas están compuestos de diferentes cantidades de sílice y óxidos de los metales de las dos secciones explicadas, y como su conocimiento es de suma utilidad para el agricultor, vamos a dar en este capítulo unas ligeras nociones de los medios de analizar las tierras arables y de corregir los defectos que puedan originarse de su composición.

”Todas las tierras arables proceden de la descomposición de las rocas que constituyen el globo. Las rocas están formadas de silicatos terrosos y alcalinos, o de carbonatos, y las acciones químicas y mecánicas del aire y del agua descomponen poco a poco y desagregan las rocas, el agua disuelve alguna de las sustancias y arrastra las demás reducidas a polvo fino y a arena más o menos gruesa que se acumulan en los sitios bajos. Allí se desarrollan en un principio plantas que sacan todo o casi todo su alimento del aire, y luego que perecen sus despojos quedan mezclados con la tierra: allí se descomponen y se convierten en mantillo, que suministra a otras plantas que se desarrollen mayor cantidad de alimento del que podrían sacar de la atmósfera. Al cabo de algunos años la descomposición sucesiva de las rocas y la destruc-



1. “Hornos para la obtención de ácido sulfuroso, quemando azufre o piritas de hierro.”

ción de las plantas que anualmente vegetan y mueren forma una capa de tierra, llamada *vegetal*, muy a propósito para el cultivo.

"De modo que la verdadera tierra arable está compuesta de arena más o menos gruesa, que puede ser silícica o caliza, parte tenue o polvo formado de arcilla o carbonato de cal, o de ambas sustancias mezcladas; de humus o mantillo, resultado de la descomposición de los cuerpos orgánicos, y de algunas sales alcalinas en pequeña cantidad. La cantidad relativa de dichas sustancias hace variar mucho la naturaleza del terreno, que depende más bien de la mezcla mecánica de estos diferentes agregados, que de su composición química. Por esta razón un análisis exacto de la composición de la tierra es menos útil al agricultor que uno que indique la relación que hay entre la arena y la parte tenue.

"Un terreno en que domine mucho la arena se llama *arenoso*; y si, como sucede generalmente, esta arena es silícea, el terreno es ligero, muy permeable al agua, se deseca rápidamente, y es poco productivo a no ser que pueda regarse con frecuencia, en cuyo caso es muy a propósito para el cultivo de las plantas, de las cuales se aprovechan las raíces o tubérculos. Así, debe destinarse para el de las patatas, zanahorias, nabos, etc.

"Se llama *arcilloso* aquel en que domina la arcilla; es muy compacto y tenaz, poco permeable al agua; el aire le deseca con lentitud, y no puede cultivarse con provecho en los puntos donde llueve con frecuencia, o en los que llueve muy de tarde en tarde, porque en los primeros está siempre inundado, y en los segundos al secarse se endurece de tal modo, que las raíces de las plantas no pueden extenderse lo necesario, ni reciben la acción benéfica del aire.

"Los terrenos calizos, compuestos en gran parte de carbonato de cal, tienen un color blanco que refleja los rayos solares, impidiendo que se caliente la tierra, mientras que calientan demasiado las partes de las plantas que están en su superficie; son poco tenaces, consumen muy pronto los abonos; no obstante, teniendo abundancia de estos y frecuentes riegos, son bastante productivos.

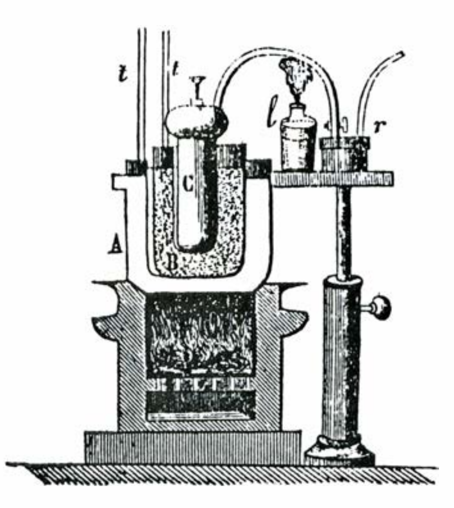
"El diferente clima en que se hallan colocadas las tierras arables hace variar notablemente su fertilidad y valor, aun cuando no se diferencien en su composición; un terreno que sea bastante arcilloso tendrá poco valor en un clima lluvioso, y será productivo en otro más seco. Los agrónomos para valuar la bondad de los terrenos adoptan como término de comparación el cultivo de los diversos cereales, sirviendo de términos extremos el trigo y el centeno; el primero vegeta aun en malos terrenos arcillosos, y el segundo puede darse en los terrenos arenosos más medianos...

"No debe olvidarse que además de la mezcla de las proporciones convenientes de la arena y arcilla o parte tenue, debe haber en un buen terreno algunas sales alcalinas y cierta cantidad de restos orgánicos o de humus o mantillo, que es la sustancia negra que resulta de la descomposición de las plantas, después de haber estado mucho tiempo expuestas a la acción combinada del agua y del oxígeno.

"Los procedimientos analíticos que se emplean para conocer la composición de una tierra arable son los que vamos a describir, y aunque los resultados que con ellos se obtienen no son muy exactos, bastan no obstante para formar juicio de la calidad del terreno.

"Se toman varias porciones de tierra a la profundidad de 3 a 4 pulgadas, del terreno que va a ensayarse, y se mezclan. De la mezcla se toman 200 gramos; se separan las piedrecitas que se pesan y examinan para conocer su naturaleza. La tierra se seca después a una temperatura de 150 a 160°, o bien metiéndola en un horno de donde acabe de sacarse el pan, pero que no tenga bastante calor para quemar algunas pajas que se echan en él antes de meter la tierra, o calentándola en una cápsula de porcelana por medio de una lámpara de espíritu de vino, procurando que el calor no sea tan fuerte que se tuesten unas virutas de madera blanca que se ponen en el fondo de la cápsula. Cuando la tierra nada pierde de peso se da por terminada la desecación, y si se quiere puede averiguarse, pesándola de nuevo, la cantidad de agua perdida por la desecación; pero es inútil tomar este dato, porque no es exacto, pues no es posible privar completamente a la tierra de su humedad, sin destruir la materia orgánica que contiene.

"Una cantidad dada de la tierra seca (100 gramos) se pone a hervir en 5 veces su peso de agua pura, y a los pocos minutos de ebullición se echa sobre un colador de hoja de lata cuyos agujeros tengan 1/4 de línea de diámetro, agitando bien la tierra para que pasen todas las partes que puedan atravesar el colador. Quedan en éste la arena gruesa o cascajo, la arena mediana y los restos orgánicos.



2. Aparato en el que "se prepara el fósforo rojo en grande a partir de fósforo ordinario".

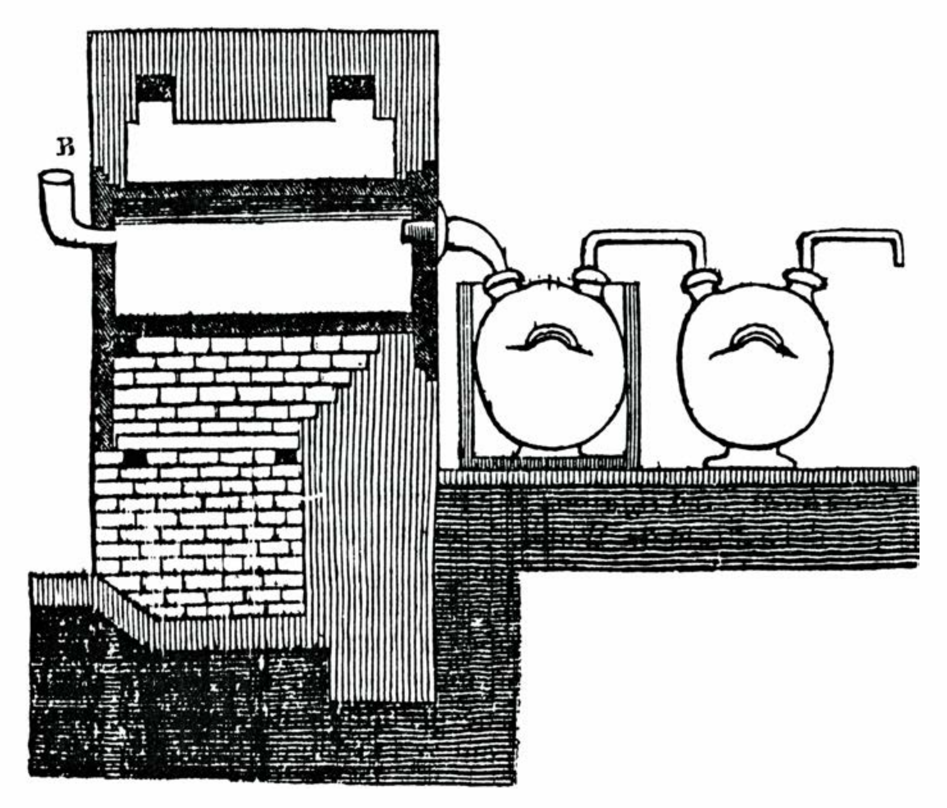
"Se separan estas materias agitándolas con agua en una vasija; los restos orgánicos suben a la superficie y se recogen con una espumadera, se secan y se pesan. Consisten comúnmente en raicillas, semillas, etc. Con un colador cuyos agujeros tengan línea y media de diámetro se separa la arena gruesa de la mediana, que se secan y pesan.

"La tierra que atravesó el primer colador contiene arena fina, que se separa de la parte tenue agitando todo en un vaso con agua, dejándolo en reposo durante un minuto, y decantando el líquido turbio sobre un filtro. Se repite unas dos veces esta operación, y se consigue recoger en el filtro la parte tenue, y en el fondo del vaso la arena fina...

"Las arenas se tratan con un ácido para saber si son silíceas o calizas; estas últimas hacen efervescencia con los ácidos, y empleando el clorhídrico se disuelven y separan de las silíceas, y pesando éstas después de lavadas y secas, puede apreciarse la cantidad de las calizas por la disminución del peso primitivo. Es aún conveniente examinar la naturaleza de la arena silícea, porque si es cuarzosa no se deshace ni descompone por la acción de la atmósfera, como la feldespática, lo que se consigue con sólo inspeccionarla; la arena cuarzosa tiene color algo agrisado, es por lo general trasluciente, y su lustre es vítreo: la feldespática es blanca, opaca, sin lustre vítreo, y más blanda que el cuarzo.

"La parte tenue de la tierra contiene *humus, arcilla, cal*, y cantidades pequeñas de óxido de hierro, magnesia, fosfato de cal, etc.

"El único medio seguro de conocer la cantidad y naturaleza del humus es



3. Instalación donde "se prepara el ácido clorhídrico líquido".

hacer un análisis orgánico elemental del modo que describiremos en la segunda parte de esta obra; pero aproximadamente puede apreciarse calcinando la tierra en un crisol al calor rojo oscuro hasta que desaparezcan todos los puntos negros, y no se perciba ninguna en ignición al menearla con un alambre de hierro; la pérdida de peso que sufre la tierra en esta operación indica la cantidad de materia orgánica. Si el olor que se desprende en la calcinación es de cuerno quemado, la materia orgánica es muy nitrogenada; si se parece al del humo de la paja, contiene poco nitrógeno.

"La cal que se halla mezclada con la arcilla en la parte tenue se separa disolviéndola en ácido clorhídrico, según hemos dicho al hablar de la arena.

"Las cantidades de magnesia, óxidos de hierro y manganeso, que pueden encontrarse en las tierras de labor, son por lo común pequeñas y pueden despreciarse en esta clase de ensayos.

"Los fosfatos terrosos se hallan también en cortas dosis, pero como juegan un papel importante en el crecimiento de las plantas, conviene averiguar su existencia y cantidad, y para esto se usa el método siguiente. Se tratan a un calor suave 20 o más gramos de la parte tenue de la tierra con ácido nítrico débil, del que se añade la cantidad suficiente para hacer una papilla; al cabo de algún tiempo se diluye en agua y se filtra. Se evapora hasta sequedad el líquido filtrado, que lleva en disolución los fosfatos y algunas otras sustancias; el residuo de la evaporación se trata con alcohol al cual se le añaden unas gotas de ácido nítrico; a la disolución alcohólica filtrada se mezcla poco a poco otra disolución de acetato plúmbico hasta que no forme precipitado. Todo el ácido fosfórico se precipita en estado de fosfato plúmbico que se recoge en un filtro, se lava y se seca; 100 partes de este precipitado representan 40 de ácido fosfórico.

"El líquido recogido al separar la arena de la parte tenue contiene las sustancias solubles; se evapora en una cápsula hasta sequedad: si el residuo es blanco, se compone de sales que generalmente son cloruros, sulfatos y carbonatos; si es de color oscuro y se vuelve blanco enrojeciéndolo, contiene sustancias orgánicas.

"El procedimiento analítico referido no es exacto, lo repetimos, pero basta para las necesidades del agricultor y para conocer por su medio si para mejorar un terreno es necesario añadirle arena, porque contiene mucha arcilla, y es por consiguiente muy compacto, demasiado *fuerte*; o si debe añadírsele arcilla, o marga, o cal, porque es muy arenoso y ligero o faltoso de carbonato calizo".

Otro aspecto de relieve de la producción de Casares fue el relacionado con la medicina. Consagró numerosos trabajos al análisis de aguas mineromedicinales y resumió su amplia experiencia sobre el tema en un *Tratado práctico de análisis químico de las aguas minerales y potables* (1866). También fue un adelantado en los estudios acerca de los anestésicos por inhalación, en especial el cloroformo. Solamente dos meses después de la célebre comunicación de James Young Simpson, en noviembre de 1847, publicó un trabajo en el que expuso que, tras conocer las experiencias del médico escocés, había preparado el cloroformo en el laboratorio de química de la Universidad de Santiago, ensayando varios métodos, uno de ellos original. Dos semanas después apareció otro artículo, que firmó en colaboración con el cirujano Andrés Laorden, con el título "Experimentos con el cloroformo". Se trata del primer trabajo de investigación experimental de tema anestesiológico realizado en España, por lo que resulta obligado reproducir sus conclusiones: "Reconocidas las ventajas de este agente como medio anestésico por la facilidad de su inhalación, prontitud y seguridad en sus efectos; probada también por los experimentos de los señores Flourens, Simpson, Gerdy y otros, y corroborada además con los nuestros la acción mortal de dicho agente llevada más allá de los límites necesarios para producir la insensibilidad, quedan aún cuestiones muy importantes que resolver. Algunas nos han ocupado de preferencia, porque al ver el entusiasmo con que varios profesores hablan de los efectos del *cloroformo* conviene saber con certeza: 1.º ¿Qué fenómenos darán a conocer que no debe continuarse la acción de este cuerpo, sin comprometer la existencia del que lo respira? 2.º ¿En el caso de que por la diferente susceptibilidad de los sujetos o por llevar demasiado lejos la acción del *cloroformo* peligre su vida, qué medios podrán usarse para evitar sus funestos resultados? 3.º ¿Qué órganos o tejidos son los atacados por el *cloroformo*?

"No nos lisonjeamos de haber resuelto estas cuestiones; pero los experimentos que vamos a referir podrán acaso contribuir a ilustrar puntos tan importantes.

"Sometido un perro a la acción del *cloroformo*, envolviendo la extremidad de su hocico en un pañuelo rociado con una dracma de este líquido, cayó en la insensibilidad al medio minuto: suspendida la inhalación al minuto y medio se

le dio una descarga eléctrica desde la cabeza a la cola por medio de una botella de Leyden pequeña: hubo conmoción, e inmediatamente después el animal empezó a hacer movimientos iguales a los que se observan cuando se sale del estado de insensibilidad. Se le aplicó de nuevo el *cloroformo* y se pasaron cuatro minutos antes de que quedase completamente insensible, notándose algunos pequeños movimientos convulsivos en las extremidades: se continuó la acción del *cloroformo*, rociando la compresa unas dos veces; y al cabo de ocho minutos, faltaron la respiración y la circulación y el animal quedó muerto al parecer. Inmediatamente se le aplicó una descarga eléctrica mayor que la de la vez primera; hubo conmoción y seguidamente se presentaron el pulso y la respiración y se notaron movimientos que indicaban su vuelta a la vida si así puede decirse. De nuevo se sujetó el animal a la inhalación del *cloroformo*, y a los diez minutos, estaba ya en el estado de muerte aparente en el cual se le dejó durante tres. Se aplicó entonces la electricidad como las veces anteriores, pero sin resultado: se repitieron las descargas algo mayores, había conmociones, pero ni la respiración ni la circulación se presentaban. Se colocaron los polos de una pila galvánica formada por dos elementos de Bunsen en la boca y el ano y en otras varias partes del cuerpo del animal: se pusieron debajo de sus narices compresas empapadas en amoníaco líquido, se introdujo en su boca una gota de ácido cianhídrico medicinal y últimamente se le hicieron insuflacciones metódicas en el pulmón sin conseguir que hiciese ningún movimiento; todo nos reveló que su muerte era verdadera. Cuando la acción del *cloroformo* iba siendo mayor hubo contracción de la vejiga de la orina, pues se verificó la emisión de este líquido que continuó algunos momentos después de la muerte.

"Tanto en éste como en los otros experimentos hemos notado que un ronquido semejante al de un sueño profundo anunciaba la pérdida de la sensibilidad y la resolución de fuerzas: continuando la acción del *cloroformo* la respiración se hacía frecuente y grande; poco después se retardaba sin perder su intensidad, de modo que en las últimas inspiraciones todos los músculos del cuerpo se ponían en acción: la circulación no presentó alteración notable hasta poco antes de desaparecer, que se hizo pequeña y frecuente.

"Examinado el cadáver, se halló todo el sistema venoso y cavidades derechas llenas de sangre negra y coagulada; el sistema arterial vacío; en las cavidades izquierdas un pequeño coágulo negro y débil como los del sistema venoso, las meninges estaban ligeramente inyectadas: el cerebro, cerebelo y médula espinal algo ingurgitados de sangre; el pulmón un poco más rubicundo que en estado normal; el hígado muy lleno de sangre, no tanto el bazo aunque más en la sangre y órganos sobrecargados de este líquido.

"Algunos de los resultados obtenidos por el señor Gerdy, de que dio cuenta en la Academia de Ciencias de París en la sesión del 13 de diciembre último, son parecidos a los que nosotros hemos observado; pero es muy notable que hayamos percibido nosotros el olor del *cloroformo* aún después de transcurridas 48 horas de la muerte del animal, cuando aquel sabio dice que las carnes y órganos de los animales muertos por la inhalación de este cuerpo no conservan su olor ni pierden nada de su sabor natural.

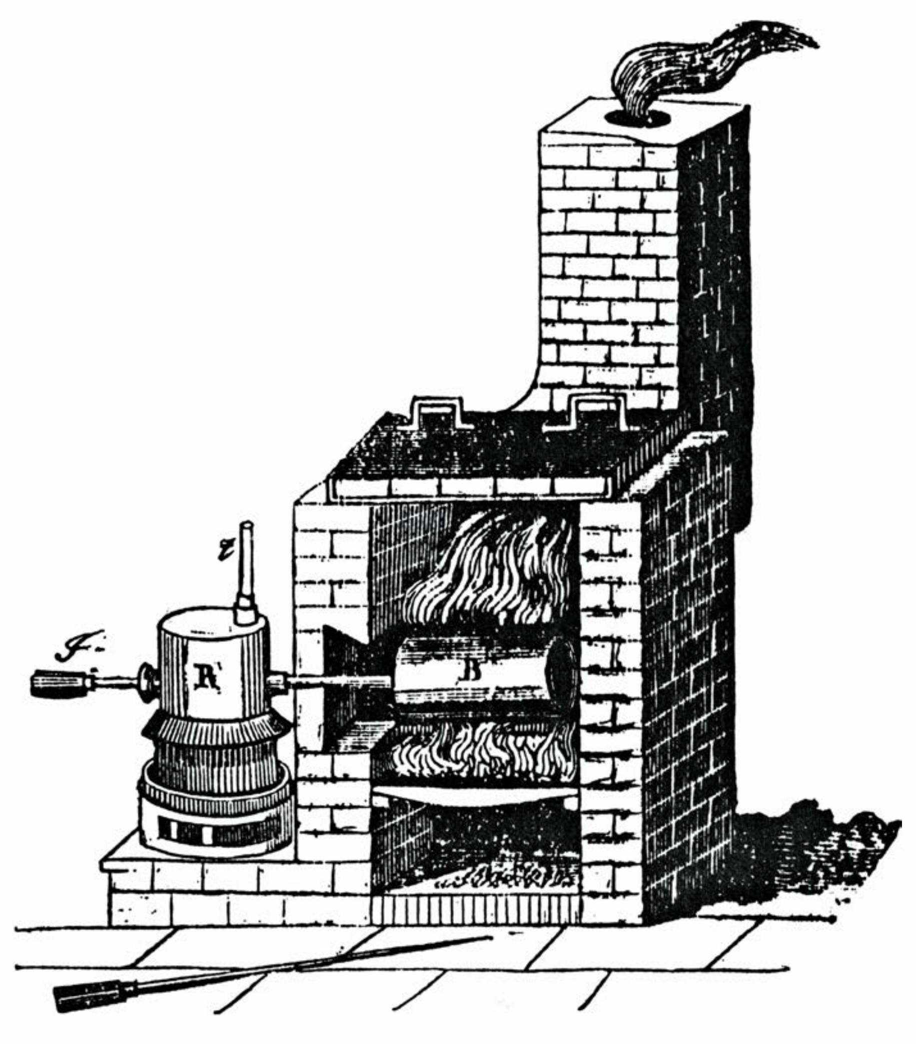
"Creemos que algunas consecuencias importantes pueden deducirse de nuestros experimentos que conviene repetir y variar para confirmarlas o modificarlas, y son:

1.º Los fenómenos respiratorios pueden servir de mucho para apreciar el diferente grado de acción del *cloroformo*.

2.º Las descargas eléctricas parece que son un medio a propósito para hacer desaparecer los efectos primitivos y aun secundarios de una intoxicación por el *cloroformo*.

3.º Las lesiones cadavéricas y el modo de obrar dicho agente indican que su principal acción se ejerce sobre el sistema nervioso, atacando y destruyendo en él la vida, sin que exista congestión sanguínea en sus centros.

4.º Si ulteriores descubrimientos nos revelan por alteraciones en el cadáver la intoxicación con el *cloroformo*, el olor a este cuerpo que despiden los tejidos, y en particular la sangre, podrá servirnos de dato en algunas ocasiones para sospechar una intoxicación".



4. "Horno para la obtención del potasio por el método de Brunner."

El crecimiento económico de Estados Unidos

Podría incrementarse mejorando la capacitación de los trabajadores, apoyando la investigación y estimulando inversiones de capital que supongan un fomento de la aplicación de innovaciones técnicas

Ralph Landau

La economía norteamericana ha gozado de un prolongado período de expansión desde 1982. Pero son muchos los signos de que la situación no es del todo favorable: gravísimo déficit federal, balanza de pagos desfavorable y el endeudamiento exterior más alto del mundo. La señal más reveladora reside en el índice de crecimiento económico, que no alcanza los niveles logrados por otras naciones industriales. Desde 1979, el índice de crecimiento anual medio del producto interior bruto (PIB) en términos reales se ha situado en torno al 2,2 por ciento en Estados Unidos, mientras que en Japón alcanzaba una media del 3,8 por ciento anual para el mismo período. La diferencia, por escasa que parezca, resulta sin embargo sumamente preocupante. En el período comprendido entre 1870 y 1913, la diferencia entre el índice medio de crecimiento anual del PIB de los Estados Unidos y de Gran Bretaña fue de sólo 2,3 puntos percentuales. Y de hecho, dado el crecimiento demográfico más rápido experimentado por los Estados Unidos durante aquel período, la diferencia en el índice de crecimiento del PIB per cápita fue de un punto. Pero bastó esa diferencia para que los Estados Unidos superasen a la que había sido primera potencia industrial en el siglo XIX, al tiempo que permitía duplicar el nivel de vida de una generación a otra. La acumulación del crecimiento económico a lo largo de períodos dilatados produce esos resultados. Así, unas pocas décimas percentuales que a corto plazo quizá parezcan poco significativas, se traducen en enormes logros económicos y sociales cuando se mantienen durante algunos decenios.

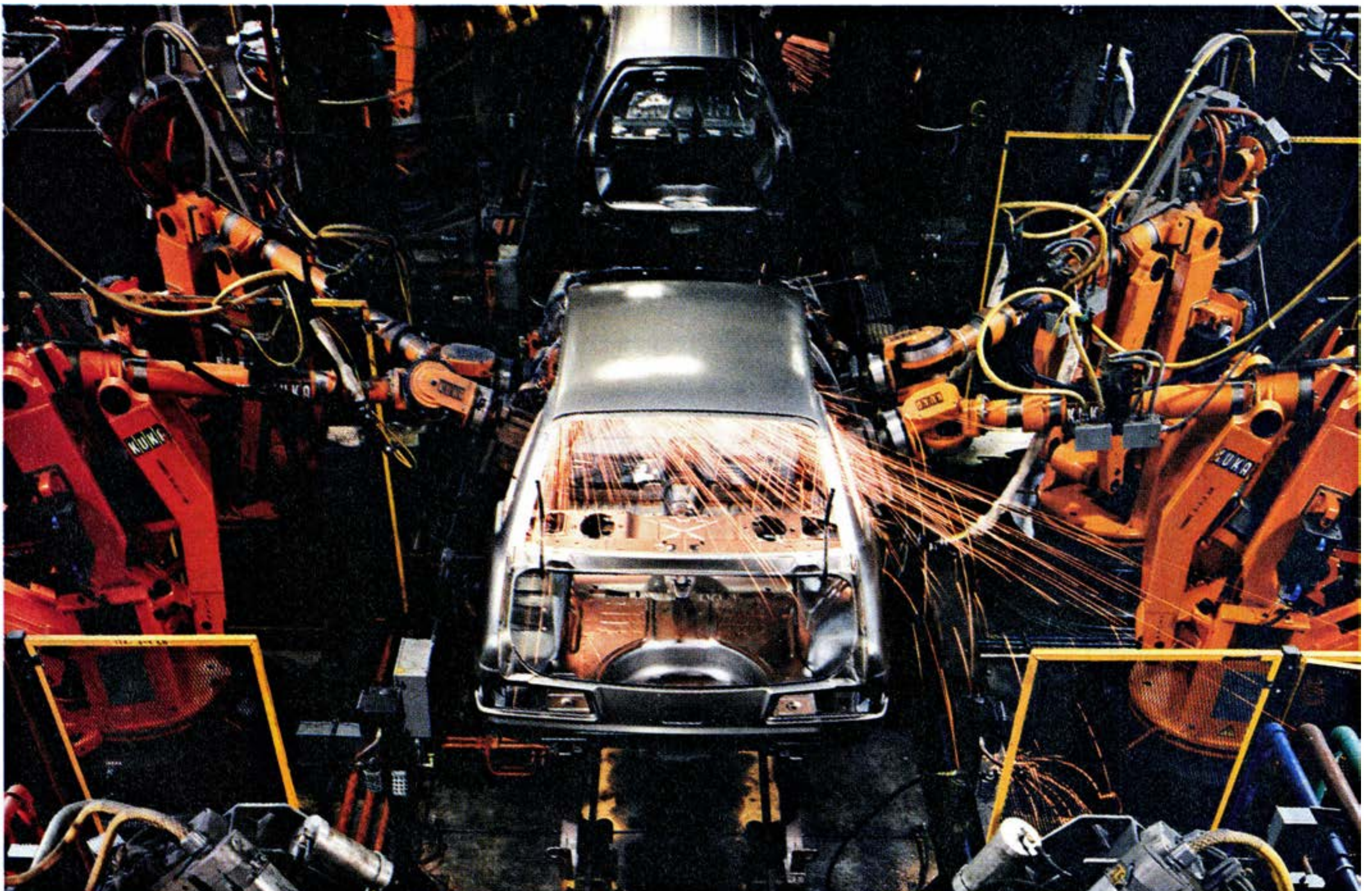
Si Estados Unidos no logra incrementar pronto su índice de crecimiento económico, no podrá seguir manteniendo la continua ampliación de las oportunidades de empleo ni la persistente elevación del nivel de bienestar material a las que se había habituado la mayoría de los norteamericanos. ¿Hay algún camino para mantener elevado el índice de crecimiento económico y asegurarse las ventajas derivadas de la expansión, así como las asociadas a una posición puntera dentro del orden económico mundial?

Coincido con mis colegas del Programa de Tecnología y Crecimiento Económico de la Universidad de Stanford y del Programa de Tecnología y Política Económica de la Universidad de Harvard en la opinión de que esa pregunta tiene respuesta afirmativa. Para lo cual nos basamos en los análisis realizados desde la doble perspectiva de la teoría económica y de nuestra experiencia en el mundo empresarial. Un examen de la intrincada trama de la economía mundial permite identificar una serie de factores interrelacionados que influyen sobre el índice de crecimiento económico de un país. Un factor determinante de primer orden es el nivel de conocimientos tecnológicos. Otro aspecto igualmente importante es la inversión del capital necesario para aplicar esos conocimientos a la fabricación de productos y a la prestación de servicios. En consecuencia, el desarrollo de nuevas tecnologías y su difusión en el conjunto de la sociedad depende, entre otros factores, de la política monetaria, presupuestaria y tributaria adoptada. Aunque no puede imponer la renovación tecnológica por la fuerza, el gobierno puede favorecer el crecimiento económico creando un clima favorable a la aplicación de los resultados de la innovación técnica en el sector privado.

En este contexto consideramos que no se ha prestado suficiente atención a la importancia de la inversión de capital como factor de estimulación del cambio tecnológico; a diferencia de lo ocurrido en otros países competidores, el gobierno de los Estados Unidos no ha creado un ambiente económico favorable para la formación de capital. Antes bien, la política de los últimos decenios ha tendido a privilegiar las inversiones a corto plazo en detrimento de las de largo plazo. Para mejorar su competitividad y lograr una mayor crecimiento económico, los Estados Unidos deben aplicar políticas alternativas encaminadas a fomentar la planificación económica de largo alcance en el sector privado.

La economía de una nación puede ampliar su oferta de bienes y servicios

RALPH LANDAU dirige Listowel Incorporated y enseña economía en la Universidad de Stanford, además de formar parte del cuerpo docente de la Facultad de Administración Kennedy de la Universidad de Harvard. En ambas instituciones codirige programas de tecnología y crecimiento económico. Doctorado en ciencias por el Instituto de Tecnología de Massachusetts, Landau aporta su experiencia al análisis de los problemas asociados a la promoción de la innovación técnica: en 1946 fue cofundador de una empresa de ingeniería química que dirigió durante 36 años. Desde 1981 preside la Academia Nacional de Ingeniería. Landau agradece la colaboración de Michael Boskin, de la Universidad de Stanford, Dale Jorgenson, de Harvard, y, muy especialmente, de Nathan Rosenberg, también de Stanford, en la preparación del artículo.



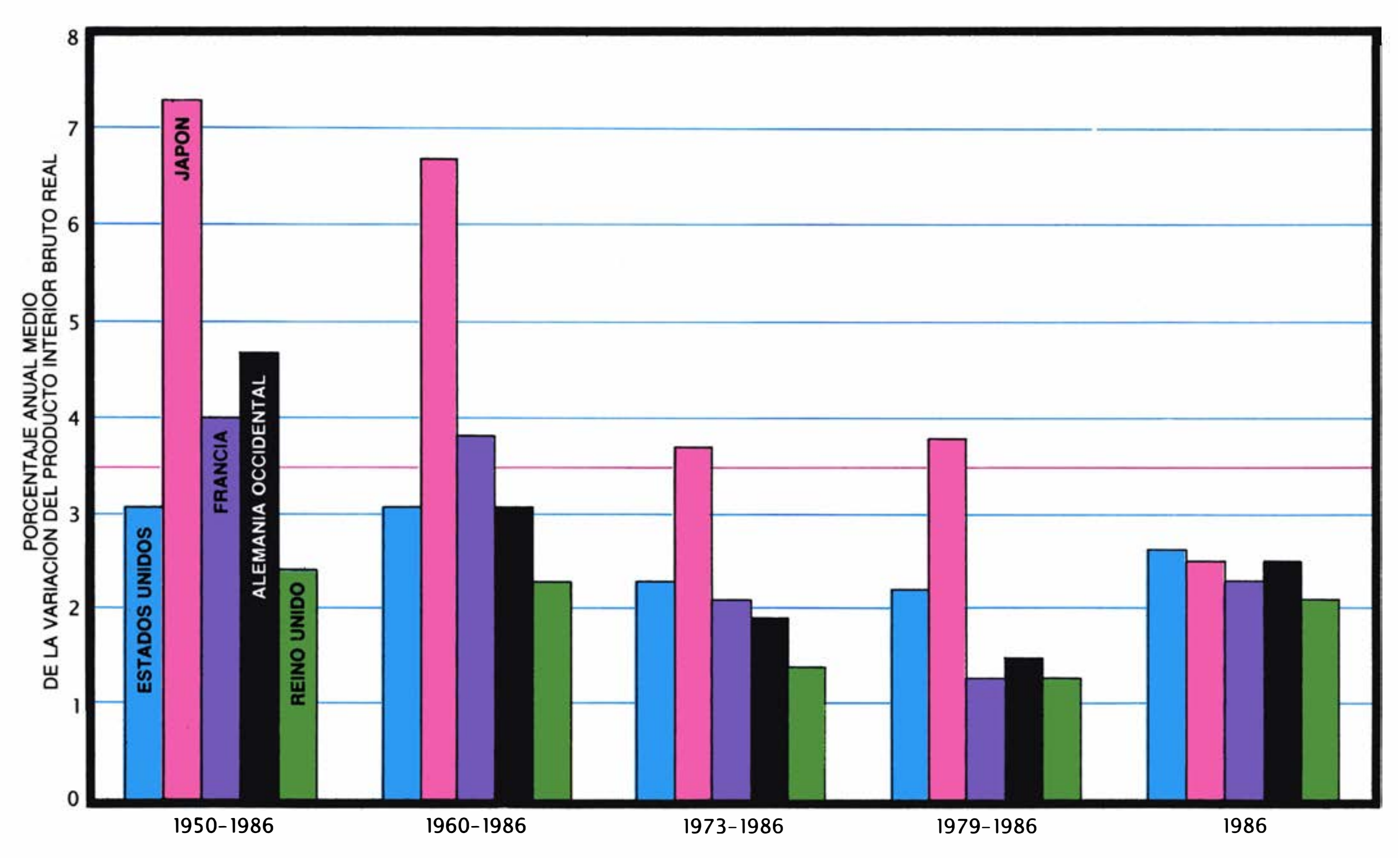
1. EL CAMBIO TECNOLOGICO que media entre las técnicas de fabricación empleadas en las líneas de montaje de la compañía automovilística Ford en 1914 (*arriba*) y en la actualidad (*abajo*) salta a la vista en estas dos fotografías. El nuevo capital (en instalaciones y equipo) incorpora las innovaciones tecnológicas y con ello estimula su desarrollo. De ahí se infiere la importancia crucial de una inversión en capital adecuada para lograr un crecimiento económico sostenido.

aumentando los factores de producción empleados, trabajo y capital (instalaciones materiales y bienes de equipo), por ejemplo, o bien incrementando el rendimiento de esos mismos factores, esto es, la cantidad de producto por unidad de insumo (*input*) de los distintos recursos. (El producto total de una economía nacional suele medirse en términos del PIB del país, esto es, el valor de todos los bienes y servicios producidos dentro del territorio nacional. A diferencia de otro parámetro habitual del producto económico, el producto nacional bruto, PNB, el PIB no incluye las transacciones internacionales.) Durante muchas décadas, los economistas vieron en la ampliación de los insumos el principal impulsor del crecimiento económico. Pero el primer intento serio de medir la incidencia de los insumos adicionales sobre el crecimiento económico —realizada en la década de 1950— puso en entredicho esa idea.

Robert M. Solow, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, entre otros, estableció la siguiente relación básica: el crecimiento de una economía es el resultado de la suma de los crecimientos de los insumos de capital y trabajo, cada uno de ellos ponderado por un coeficiente que refleje su contribución media al valor de los productos, en conjunción con una tercera variable que representa el incremento de la productividad de los factores (la productividad combinada del capital y el trabajo). En un primer momento, la mayoría de los economistas se limitaron a designar la tercera variable con el nombre de "cambio tecnológico" y a relacionarla con la investigación científico-técnica. Sin embargo, en ella intervienen a todas luces otros elementos importantes, como la asignación más eficaz de los recursos y las economías de escala, al igual que gran número de factores sociales, educativos y de organización que ayudan a mejorar la calidad de la fuerza de trabajo y de la gestión empresarial.

En la formulación original de la relación, las tres variables se las supone independientes; en consecuencia, la aceleración del crecimiento de la inversión de capital no influye en el ritmo de incremento de la productividad, por ejemplo. La parte del crecimiento económico atribuible al incremento de la productividad aparece, por tanto, como la diferencia entre la tasa de incremento del producto y la suma ponderada de las tasas de ampliación del capital y de la fuerza de trabajo. Por este procedimiento, Solow y otros estimaron que hasta un 85 por ciento del crecimiento económico per cápita históricamente registrado en los Estados Unidos parecía atribuible a incrementos de la productividad o a innovaciones tecnológicas. (Solow fue galardonado el pasado año con el premio Nobel de economía por este trabajo y por otras aportaciones al estudio del crecimiento económico.)

Moses Abramovitz, de la Universidad de Stanford, había aplicado con anterioridad una técnica similar y había observado que sólo alrededor del 15 por ciento del crecimiento económico resultaba atribuible al incremento de insumos utilizados. No obstante, se mostró bastante cauteloso a la hora de interpretar el importante 85 por ciento restante, que describió como "una medida de nuestra ignorancia". Comoquiera que fuere, de esos primeros análisis parecía desprenderse que el crecimiento económico a largo plazo alcanzado por el país hasta la fecha se había logrado, en gran medida, a través de una mejor utilización del capital y el



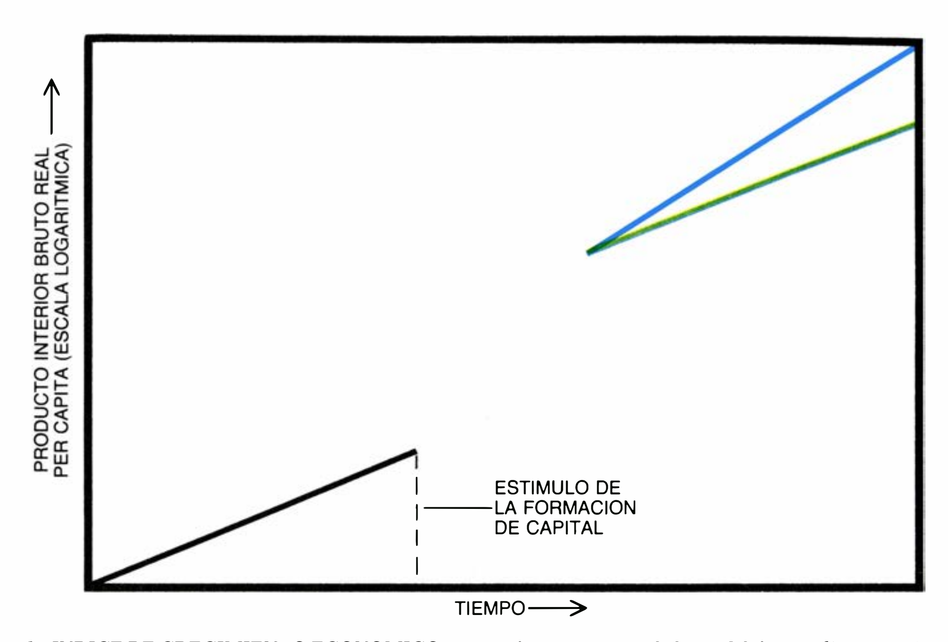
2. COMPARACION INTERNACIONAL entre los índices anuales medios de crecimiento económico; indica que éstos han sido inferiores en los Estados Unidos que en el Japón. El autor argumenta que, para garantizar la prosperidad económica a largo plazo, los Estados Unidos deberían intentar el logro de un índice medio de crecimiento del 3,5 por ciento anual (*línea roja*). (El producto interior bruto equivale al valor de todos los bienes y servicios producidos dentro de las fronteras de un país. Se distingue del producto nacional bruto en que no incluye en su cómputo el saldo neto de las transacciones internacionales.)

trabajo; no se debía a una ampliación de esos insumos.

Cálculos posteriores sobre datos correspondientes a fechas más recientes modificaron ligeramente esa apreciación. En efecto, frente al incremento medio de un 1,19 por ciento anual de la productividad de los factores de la economía estadounidense entre 1913 y 1950, en el período 1973-1984 ésta disminuyó en torno a un 0,27 por ciento anual. Asimismo, en contra de las deducciones realizadas por Solow, Abramovitz y otros a partir de datos anteriores, casi la totalidad del crecimiento del PIB estadounidense de finales de la década de 1970 se consiguió a través del incremento de los insumos de capital y trabajo (particularmente de este último factor en un momento de apogeo de la "oleada de nacimientos").

Se han ofrecido diversas explicaciones de este asombroso descenso de la productividad de los factores. Estudios comparativos entre sectores concretos de las economías japonesa y estadounidense realizados por Dale W. Jorgenson, de la Universidad de Harvard ofrecen un planteamiento prometedor. Sus resultados sugieren que la tasa de inversión en capital por trabajador —la cantidad de dinero invertida en la ampliación del stock de capital del país— influye significativamente en el rendimiento del trabajo. El estudio de Jorgenson también indica que las tasas de incremento de la productividad de los factores registradas en Japón (con una media del 0,43 por ciento anual entre 1973 y 1984) estuvieron impulsadas en gran medida por la elevada tasa de inversión de capital efectuada en determinados sectores industriales. De hecho, la tasa de inversión japonesa duplicó, por lo menos, la registrada en muchos sectores industriales estadounidenses.

Apoyándose en datos recientes y aplicando una metodología más elaborada que cuantifica el precio del capital en relación a su antigüedad, Jorgenson establece que, a partir de la Segunda Guerra Mundial, un 40 por ciento del crecimiento del PIB estadounidense debe atribuirse a la inversión de capital, mientras que la productividad de los factores estaría detrás de un 30 por ciento del mismo. El resto puede relacionarse con incrementos cualitativos y cuantitativos del factor trabajo. Angus Maddison, de la Universidad holandesa de Groningen, acaba de llegar a conclusiones análogas después de revisar varios estudios sobre el crecimiento realizados en los últimos 30 años.



3. INDICE DE CRECIMIENTO ECONOMICO: se mantiene constante a lo largo del tiempo (*línea negra*) cuando la formación de capital (construcción de nuevas fábricas y nuevo equipo de producción), el perfeccionamiento de la fuerza de trabajo (capacitación de los trabajadores) y el cambio tecnológico (la aplicación de nuevos inventos) avanzan a un ritmo constante. Cuando los cambios introducidos en la política económica nacional estimulan la formación de capital, aumenta el índice de crecimiento (*línea roja*), pues se amplía con ello la capacidad de producción de bienes y servicios del país. Si no existe una interacción entre el índice de formación de capital, la calidad de la fuerza de trabajo y el ritmo de renovación tecnológica, la economía acaba recuperando el índice inicial de crecimiento (*línea verde*). En cambio, si un incremento del índice de formación de capital acelera la mejora cualitativa de la fuerza de trabajo y estimula la innovación tecnológica, el índice de crecimiento puede registrar entonces un incremento a largo plazo (*línea azul*).

Otros datos apuntan también hacia una estrecha correlación entre las tasas nacionales de inversión de capital, por un lado, y el crecimiento de la productividad y el desarrollo económico, por otro. En ese orden, Alemania occidental y Francia, con tasas de inversión que representan aproximadamente el doble de la registrada en los Estados Unidos, presentan también una tasa de incremento de la productividad que viene a doblar la estadounidense. (Debe tenerse en cuenta que las mediciones del incremento de la productividad no suelen tener en cuenta las mejoras de la calidad de los bienes y servicios, aspectos también importantes.)

¿De qué modo la inversión de capital estimula la productividad para inducir el crecimiento económico? La respuesta debe buscarse en la forma en que se incorpora al capital el cambio tecnológico. Salvo una pequeña parte dedicada a desarrollar los fundamentos científicos, pocas veces se emprende una investigación a menos que se confíe en aplicar sus resultados al diseño de nuevas instalaciones y modos de operación superiores, que aumenten la productividad, reduzcan los costes o mejoren la calidad de los bienes y servicios. En consecuencia, la inversión de capital, además de incorporar el progreso tecnológico, lo estimula también, en la medida en que la posibilidad de disponer de una tecnología superior constituye un importante incentivo para la inversión. Pero sólo mediante la investigación puede desarrollarse una tecnología superior. La inversión de capital actúa, por tanto, como un catalizador que puede poner en marcha un "círculo virtuoso" autoalimentado, que correlaciona el cambio tecnológico con la investigación y que, en última instancia, se traduce en un incremento de la productividad o en la mejora cualitativa de los bienes y servicios.

Análogamente, los avances en la calidad de la fuerza laboral como resultado de la ampliación de los conocimientos y la formación pueden interpretarse como otra forma de inversión (en "capital" humano), que es a la vez requisito previo y factor de inducción del cambio tecnológico. Dicho de otro modo, el cambio técnico aparece incorporado en cada uno de los factores básicos de producción. Esta relación se verifica en mucho mayor grado de lo que se venía suponiendo, aunque resulta difícil cuantificar su alcance exacto.

Como señalan Michael Boskin, de la Universidad de Stanford, y otros, tales interacciones entre cambio tecnológico, capital y calidad de la fuerza de trabajo determinan que el aumento de la

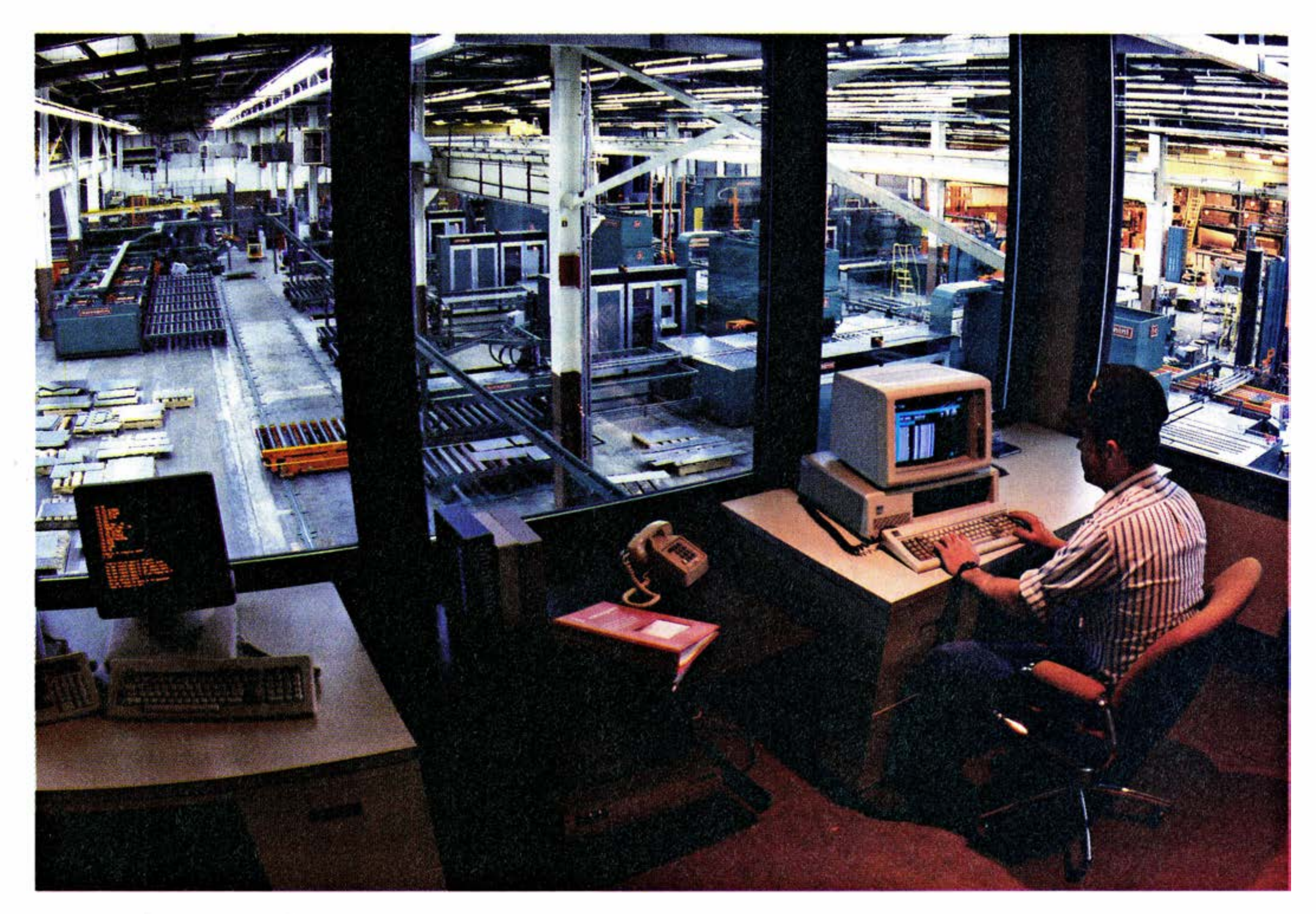
tasa de inversión de capital incremente el índice de crecimiento económico durante un período largo. Esto es particularmente cierto en lo que respecta al aprovechamiento de los resultados de las investigaciones "punteras", que requieren grandes inversiones de capital, pero también pueden crear sectores industriales completamente nuevos. Por desgracia, muchos directores de empresa, funcionarios y economistas no comprenden todavía estas relaciones críticas de la teoría del desarrollo. Suelen éstos defender que el incremento de la tasa de inversión de capital no contribuiría apreciablemente a acelerar el cambio tecnológico ni a mejorar la calidad de la fuerza laboral.

Solow se ha unido recientemente a las filas de quienes critican este planteamiento. Manifiesta sus temores de que hayan podido exagerarse las implicaciones de su teoría del desarrollo, que infravaloraba la importancia del capital, lo cual podría haber favorecido "una grave subinversión" de capital físico. Puesto que "no podemos practicar métodos nuevos con instalaciones viejas", Solow propugna una ampliación del gasto en los centros de investigación y fábricas experimentales del país, las fuentes del cambio tecnológico.

Se hace necesario modificar, por tanto, las anteriores distinciones entre la influencia del cambio tecnológico, del capital y del trabajo sobre el crecimiento económico, para relacionar e integrar todos esos aspectos en un mismo proceso. El cambio tecnológico ha desempeñado un papel motor del crecimiento económico de los Estados Unidos, directamente (y en este aspecto podría atribuírsele alrededor del 30 por ciento del mismo) y también a través de su influencia positiva sobre otros factores de producción (vía a la que podría atribuirse aproximadamente otro 40 o 50 por ciento del crecimiento económico). Aunque las investigaciones académicas no han ofrecido todavía pruebas concluyentes en este sentido, mis colegas y yo mismo tenemos la convicción de que la clave para el desarrollo de estrategias viables que permitan impulsar el crecimiento económico en el futuro deberá buscarse en la innovación tecnológica: podría acelerar el ritmo de incremento de la productividad de los factores.

Las interacciones entre cambio tecnológico, inversión de capital y calidad de la fuerza de trabajo permiten definir algunas estrategias que deberían aplicar las empresas estadounidenses para lograr un crecimiento económico sostenido. Las empresas de todos los sectores de la economía deben adaptarse a un ritmo de renovación más acelerado, insistiendo en la formación permanente de sus trabajadores y suprimiendo las políticas empresariales envejecidas que oponen obstáculos innecesarios a la innovación tecnológica.

Esto resulta particularmente necesario en el sector industrial, en cuyo ámbito se desarrolla alrededor del 95 por ciento de la actividad privada de investigación. A este sector corresponden también la mayoría (unos dos tercios) de las exportaciones comerciales estadounidenses. (De hecho, el grueso de la investigación, así como la mayor parte de la actividad exportadora, corresponden a un puñado de grandes empresas manufactureras, que tienden



4. GRACIAS AL PRINCIPIO DE FLEXIBILIDAD, aplicado en la fabricación de paneles de iluminación en la planta que la General Electric tiene en Salisbury, Carolina del Norte, han bajado un 30 por ciento los costes y se han establecido, para los pedidos, plazos de entrega de pocos días, frente a las semanas de antes.

a ser también las que más invierten en nuevo capital.) El sector industrial compra igualmente una porción importante de la producción del sector de servicios, el cual a su vez contribuye a mejorar la productividad de aquél. Por último, el sector industrial produce materiales esenciales para la seguridad nacional.

Dada la importancia fundamental del sector industrial en la economía estadounidense, difícilmente podrá tener éxito ninguna estrategia de crecimiento económico que no le preste la debida atención. Un medio de dotar al sector de una rápida capacidad de respuesta ante las variaciones del mercado sería aplicar en mayor medida la técnica de fabricación flexible, esto es, la fabricación de diferentes productos con la misma dotación de capital. Para aprovechar plenamente las ventajas que ofrece esta modalidad es preciso un diseño de los productos en perfecta sintonía con las necesidades del mercado y capaz de lograr rápidas reducciones de los costes de producción. Como han sabido reconocer los japoneses, los consumidores exigen también continuas mejoras en la calidad y fiabilidad, lo cual obliga a un estrecho contacto entre la fábrica de una empresa y sus departamentos técnicos y de comercialización. Los conocimientos de los ingenieros, como principales agentes del cambio tecnológico, deben ir mucho más allá del ámbito científico y de la ingeniería, para incluir también la capacidad de análisis económico y su aplicación para afrontar los riesgos técnicos y comerciales. También resulta esencial una mayor participación de los trabajadores, un aspecto clave de la estrategia industrial japonesa que tan buenos resultados ha logrado.

Esas plantas industriales flexibles, integradas a escala nacional, facilitarían la rápida disponibilidad de nuevos productos, acordes con las exigencias del mercado, así como la introducción de nuevos procesos industriales por un mejor conocimiento y una mayor experiencia. Para mantener la competitividad es preciso que este perfeccionamiento de los productos y de los procesos se efectúe a un ritmo acelerado. Si se actúa con prudencia, puede recuperarse en gran parte el capital invertido antes de que la imitación por parte de la competencia representen ningún peligro. Entre las empresas norteamericanas que han cosechado éxitos por esos medios cabe citar a Allen-Bradley, Caterpillar, Chrysler, John Deere, General Electric, Hewlett-Packard, International Business Machines y Westinghouse.

Aun así, las empresas norteamericanas que fabrican una gama reducida de bienes mecánicos (automóviles, electrodomésticos y productos electrónicos de consumo) han encontrado problemas a la hora de implantar esa integración del diseño, producción y comercialización; débese ello, en parte, a la renuencia a adoptar un enfoque "sistemático", con un continuo trasvase de información entre los distintos departamentos de la empresa. Por el contrario, las industrias químicas y de refinado de los Estados Unidos se han mostrado mucho más receptivas, gracias, en buena medida, a la adopción más temprana de ese enfoque por la ingeniería química.

Las industrias que hacen amplio uso de los ordenadores, la automación y las telecomunicaciones disfrutan de una situación ventajosa. Encajan bien con la manera de ser norteamericana, de reconocida capacidad para crear el tipo de empresas innovadoras que generan la mayoría de los nuevos puestos de trabajo. Aunque las industrias con un producto definido, como la petroquímica y la siderúrgica, deberían aparentemente encontrarse en una posición desfavorable, algunas pueden conservar su competitividad siempre que gocen de ventajas significativas en términos de escala, de recursos o de tecnología. Pero podría resultar inevitable el traslado de la actividad industrial a países con niveles salariales inferiores. Ninguna estrategia económica sirve para todas las empresas.

El sector de servicios también puede beneficiarse de la rápida integración de las tecnologías informatizadas y de la transformación de la fuerza de trabajo. Incluso en aquellos casos en los que la mayor parte del valor añadido a un producto procede de la comercialización, la venta y la distribución, siguen requiriéndose grandes cantidades de capital, así como un inmediato trasvase de la información al sector industrial. Ello puede ayudar a ambos sectores a añadir más valor a los productos o servicios que ofrecen. En cuyo caso, el incremento salarial representaría sólo una pequeña fracción del coste total de producción, lo cual situaría a las empresas norteamericanas en una posición competitiva ante países con niveles salariales inferiores. El aspecto fundamental a destacar es que los sectores con un alto valor añadido por trabajador cuentan con bastante capital tangible (instalaciones y maquinaria, por ejemplo) e intangible (formación de los trabajadores, mercados bien desarrollados y conocimientos técnicos) por trabajador.

El sector privado tiene que aplicar la estrategia descrita hasta aquí si desea mantener su competitividad en los mercados interiores e internacionales. Cuanto ocurre en este plano microeconómico acaba determinando en última instancia los índices de crecimiento a largo plazo y puede verse también afectado por factores que inciden sobre la "vertiente de la oferta", como puede ser la política gubernamental en materia fiscal, comercial, ambiental y laboral. Por otra parte, el sector privado debe operar dentro de un entorno macroeconómico definido primordialmente por las políticas fiscales y monetarias de la nación. Estas medidas, que controlan la "vertiente de la demanda" de la economía, suelen configurarse en respuesta a exigencias políticas y como reacción ante la multiplicidad de problemas cíclicos y a corto plazo que atenazan a la economía. De ahí las frecuentes variaciones que sufren.

Un entorno macroeconómico tan inestable puede resultar poco propicio para las grandes inversiones en investigación, convirtiéndose en un impedimento para el crecimiento económico prolongado. La ciencia y la tecnología necesitan trabajar con horizontes distantes y se infravaloran forzosamente sus aportaciones cuando se miden los rendimientos a corto plazo de la inversión en investigación.

En los últimos años ha prevalecido un clima económico que primaba los rendimientos rápidos, consecuencia, en gran parte, de la inflación de la década de 1970. Todavía continúa vivo el recuerdo de las tasas de inflación de dos dígitos registradas entonces, como indican los altos tipos reales de interés de los bonos a largo plazo. Por su causa se les ha dado beligerancia a los expertos en temas financieros, en detrimento de los especialistas en promociones y salarios, y se ha otorgado prioridad a los programas de investigación de corto alcance frente a otros proyectos a más largo plazo que podrían ofrecer descubrimientos técnicos innovadores.

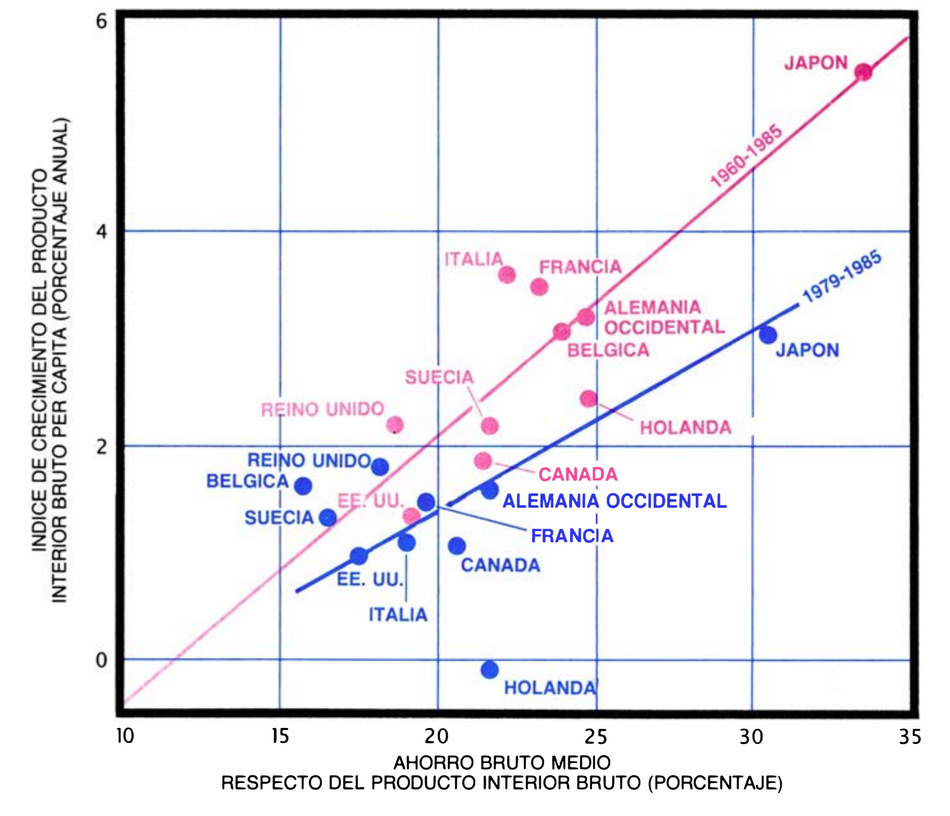
De forma similar, las recientes políticas de "estabilización" económica repercutirán adversamente sobre el crecimiento durante muchos años. Quizás el aspecto más crítico en este sentido sea el progresivo endeudamien-

to. Los déficits gubernamentales, que han llegado a ser del orden de los 200.000 millones de dólares anuales, se financian en gran medida con el ahorro nacional, con lo cual se restringe la cantidad de dinero disponible para inversiones de capital. Al mismo tiempo, en todos los sectores ha crecido el endeudamiento privado. En 1986, el total de la deuda pública y privada representó más del 200 por ciento del PIB, frente a un 163 por ciento en 1975. Este fuerte endeudamiento ha provocado una enorme "inflación" de los créditos, ya de por sí peligrosa, pues en cuanto se inicie un retroceso económico la atención a la deuda restará inversión en capital.

En consecuencia, las empresas muy endeudadas no aceptarán tan fácilmente los riesgos de un programa de investigación a largo plazo o de la inversión en nuevo capital. De hecho, el estímulo negativo que pesa sobre la inversión a largo plazo, unido a la disminución de los tipos de interés en relación a las altas cotas alcanzadas a principios de los años ochenta, atrae a los inversores hacia los valores más corrientes, alimentando un mercado de valores en expansión, aunque muy inestable. Al propio tiempo, los inversores comienzan a privilegiar los instrumentos financieros de mayor rentabilidad y más alto riesgo.

Parte del endeudamiento, sobre todo el resultante de la venta de estos últimos títulos, se ha canalizado a través de fusiones, adquisiciones, absorciones, reestructuraciones y compra de participaciones mayoritarias. En la práctica, las acciones han sustituido a los títulos de deuda, táctica que se ve favorecida por las leyes fiscales que permiten la desgravación de los intereses pero no de los dividendos del impuesto de sociedades; con lo cual el Departamento del Tesoro de los Estados Unidos se ha convertido, de hecho, en un aliado de esas operaciones. El abaratamiento de los créditos que ello supone ha dotado de mayores atractivos a las absorciones y adquisiciones frente a las inversiones productivas, que requieren un acceso más meditado al crédito y unas acciones más "caras".

Nadie duda de que las compañías afectadas mejoran a veces su eficacia; la reestructuración ha permitido avanzar en la productividad y el control de costes en el sector fabril norteamericano. Pero, en la mayoría de los casos, los únicos beneficiados son los accionistas (y éstos sólo a corto plazo); el resto carga con las consecuencias negativas, a través de las limitaciones que ello impone a la creación de empleo, al dinero disponible, a los mercados y a la investigación orientada hacia el futuro. Además, la empresa (cuando no queda desmembrada) sigue operando con relaciones endeudamiento-patrimonio sumamente precarias, circunstancia en absoluto favorable para el crecimiento a largo plazo.



5. CORRELACION DE LAS TASAS NACIONALES de ahorro con los índices de crecimiento per cápita. En efecto, el ahorro agregado de un país representa un fondo de dinero al que pueden recurrir las empresas para la formación de capital. Como puede apreciarse en el gráfico, los Estados Unidos presentaron una de las tasas de ahorro más bajas entre las naciones industriales, tanto en el período 1960-1985 (*rojo*) como entre 1979 y 1985 (*azul*). La menor inclinación de la línea que une los datos más recientes manifiesta el descenso general de los índices de crecimiento que se ha registrado en todo el mundo a partir de 1979.

Una estrategia macroeconómica prudente de fomento del crecimiento a largo plazo debería contemplar una rigurosa política fiscal (para reducir el déficit gubernamental), una política monetaria más flexible (encaminada a reducir los tipos de interés y a estabilizar el valor del dólar estadounidense) y un sistema impositivo más favorable a la inversión que al consumo. (También resultarían favorables algunas modificaciones del sistema jurídico y normativo que permitieran reducir gastos procesales innecesarios.) Probablemente la condición previa más importante sea disponer de abundante capital a bajo coste en todas sus formas, incluido el capital necesario para mejorar la educación y la formación profesional y para la investigación; el capital debería incorporar también la tecnología más eficiente disponible. Lo cual se traduce, sobre todo, en la necesidad de adoptar políticas encaminadas a favorecer los altos niveles de ahorro, puesto que el dinero para las inversiones de capital debe obtenerse de las reservas de ahorro de la nación.

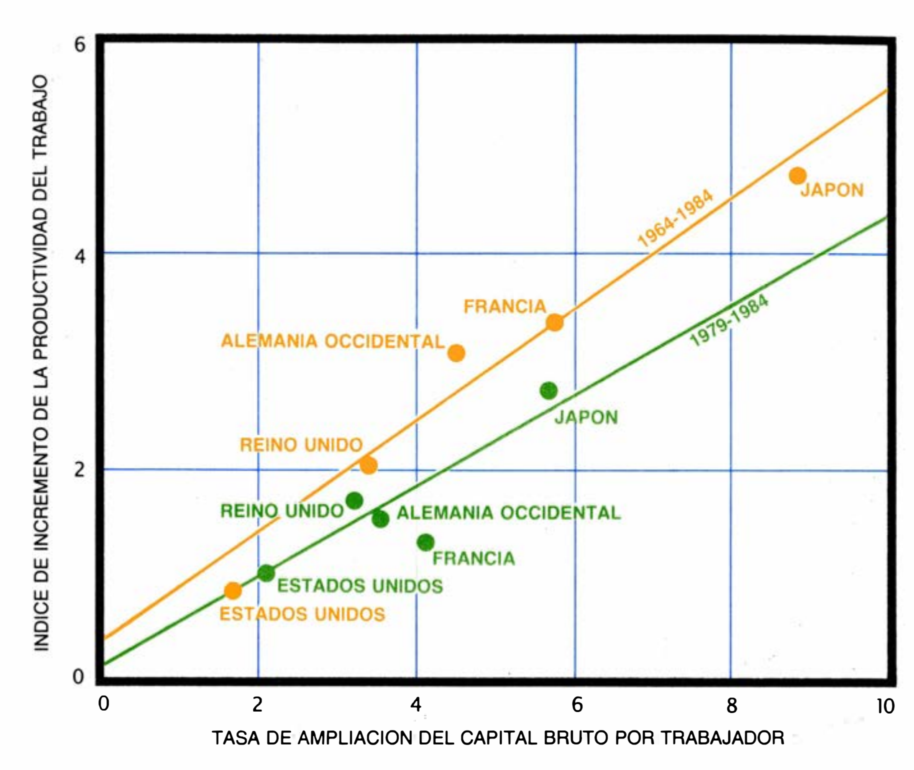
Boskin señala que la tasa de ahorro del Japón duplica o casi triplica la de los Estados Unidos, según el método que se utilice para medirla. Gracias a esa alta tasa de ahorro, los japoneses pueden realizar importantes inversiones nacionales e internacionales a largo plazo y al mismo tiempo financiar el gasto público. Esa es también la razón de que el coste efectivo del capital japonés haya venido representando entre la mitad y la tercera parte del coste del capital norteamericano. (Otras causas del mayor coste del capital norteamericano serían los elevados tipos de interés exigidos por unos inversores recelosos después de haber sufrido las consecuencias de las anteriores políticas económicas y la "doble carga fiscal" que grava las rentas de las sociedades a través de la tributación de los dividendos.) Al aplicarse en el Japón una tasa de actualización de los rendimientos futuros dos o hasta tres veces

inferior a la aplicable en los Estados Unidos sin dejar de cubrir el coste de la inversión, los empresarios japoneses pueden tomar decisiones a un plazo mucho más largo. Ello les deja las manos más libres para financiar proyectos de investigación y les permite también incurrir en pérdidas considerables durante el proceso de apertura de mercados en el extranjero (como hicieron en el caso de las videograbadoras). Estas actividades suelen requerir planteamientos a más largo plazo que la inversión en planta y equipo.

La mayoría de los economistas coinciden en señalar que un impuesto progresivo sobre el consumo −empezando tal vez por la subida de los impuestos sobre la gasolina, el tabaco y las bebidas alcohólicas− favorecería el incremento de las tasas de ahorro y de inversión, siempre que no abriese la puerta a la introducción de nuevos programas de gasto que incrementaran el consumo. Los Estados Unidos podrían reducir el coste del capital apoyándose más en el sistema de impuestos sobre el consumo que en el impuesto sobre la renta.

La Ley de Reforma Tributaria de 1986, pese a algunos aspectos positivos, constituye un claro ejemplo de lo que no debe hacerse. Gravará, probablemente, el coste de los fondos para la inversión, al desaparecer la desgravación de las inversiones, al mismo tiempo que se modifican las cuotas de depreciación y se suprime el tipo diferencial sobre las ganancias de capital. Es curioso que, pese a que la ley de 1986 reconoce implícitamente la conveniencia de introducir incentivos en favor de la investigación, no tiene en cuenta los incentivos para las necesarias inversiones de capital concomitantes. Otro ejemplo de la penalización del ahorro traída por la ley de 1986 son las cláusulas que restan considerable atractivo a los fondos personales de jubilación. David A. Wise, de la Universidad de Harvard, defendía recientemente que la sustitución de estos fondos por otras formas de ahorro es escasa, es decir, que representan una prometedora nueva fuente de ahorros netos.

Comparadas con la incidencia de esas medidas macroeconómicas, otras intervenciones del gobierno podrían resultar menos espectaculares, aunque ello no menoscaba su importancia para favorecer un mayor crecimiento a largo plazo. Entre ellas citaremos el apoyo general al sistema educativo, la financiación de la investigación, el mantenimiento de la infraestructura necesaria para el comercio (por ejemplo, la red nacional de carreteras) y la creación de sistemas de protección para los excluidos del reparto de los frutos del crecimiento económico.

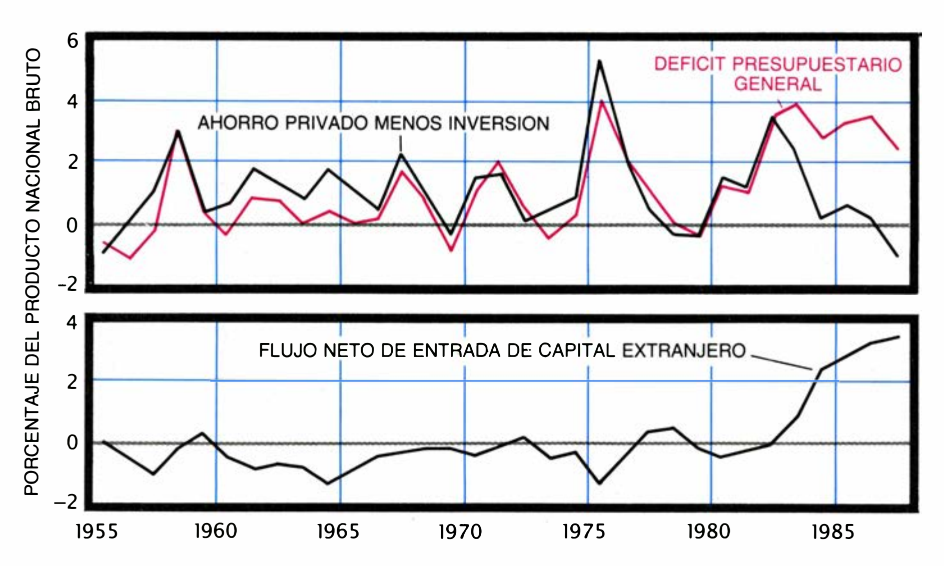


6. TASA DE AMPLIACION DEL CAPITAL por trabajador. Determina el incremento de la productividad del trabajo. Los Estados Unidos no aumentaron su inversión en capital por trabajador al mismo ritmo que el Japón y, en consecuencia, la productividad del trabajo creció más lentamente durante los períodos 1964-1984 (*naranja*) y 1979-1984 (*verde*). La mayor inclinación de la recta que une los datos correspondientes al período 1964-1984 se debe a que, en esos momentos, el Japón y otros países intentaban "dar alcance" a los Estados Unidos con la construcción de nuevas instalaciones dotadas de las más modernas tecnologías.

Evidentemente, pueden aducirse razones válidas para la aplicación de políticas macroeconómicas contrarias al objetivo del crecimiento continuado. Por ejemplo, las políticas adoptadas por el gobierno federal durante los últimos 20 años han tendido a dar prioridad a la creación de empleo frente a la formación de capital. Se indujo a las empresas a sustituir la inversión de capital por el empleo de mano de obra más barata y, de hecho, se crearon muchos puestos de trabajo, muchos más que en Europa y Japón. Entre 1955 y 1986, en los Estados Unidos se crearon 47,4 millones de nuevos puestos de trabajo, frente a l6,6 millones en el Japón y un total de sólo 5,7 millones en la Comunidad Económica Europea. Y en estos momentos el desempleo alcanza cifras de dos dígitos en Europa, mientras que en los Estados Unidos se ha reducido hasta alrededor de un 5,5 por ciento. Dada la amenaza potencial para la paz interior que representan los altos niveles de desempleo, el extraordinario éxito de los Estados Unidos en el ámbito de la creación de empleo podría justificar muy bien a posteriori algunas de las políticas económicas aplicadas en el pasado. Pero estas políticas han supuesto un menor incremento de la productividad y un anquilosamiento de los stocks de capital.

Todo lo expuesto hasta aquí resulta bastante más complejo en la práctica, porque la economía estadounidense debe operar en un mercado global, no sólo de bienes y servicios, sino también de tecnología y monetario. Se compran y venden bienes y servicios en muy gran escala. Y con la apertura del comercio muchos países han empezado a competir duramente con los Estados Unidos en el mercado internacional, ofreciendo a menudo productos de mejor calidad y más baratos.

Las nuevas tecnologías se difunden con más rapidez que nunca entre países, muchos de ellos con niveles de salarios considerablemente inferiores a los de Estados Unidos. En el siglo pasado, la transferencia de tecnología de un país a otro duraba varios años; hoy es cuestión de meses. Entre las causas de tan rápida difusión cabe citar la inversión en el extranjero (sobre todo de empresas multinacionales que se establecen más cerca de sus mercados), las



7. LOS DEFICITS PRESUPUESTARIOS suelen financiarse con empréstitos obtenidos a partir de los ahorros privados, una vez cubiertas las necesidades de inversión de un país. Sin embargo, desde 1982, los presupuestos del gobierno federal y de las administraciones estatales y locales de los Estados Unidos han sumado en conjunto déficits considerables, pese al escaso excedente de fondos procedentes de los ahorros. Para compensar la insuficiencia del ahorro nacional, las empresas han tenido que acudir al ahorro extranjero.

patentes internacionales, la formación de muchos científicos e ingenieros en las universidades occidentales, la rápida publicación de las investigaciones y la creciente facilidad de los viajes y las comunicaciones internacionales.

Una de las consecuencias de la rápida difusión de la tecnología a escala mundial es que no todas las innovaciones tecnológicas las comercializan necesariamente los países que las han producido. La televisión en color, por ejemplo, fue un invento norteamericano que los japoneses perfeccionaron y comercializaron magníficamente luego. Por otra parte, algunos países presentan tasas de inversión de capital muy superiores a las de los Estados Unidos. En consecuencia, sucede a menudo que la nueva tecnología productiva desarrollada en Norteamérica se materializa antes en forma de capital en el extranjero. Con ello los competidores de los Estados Unidos logran incrementar antes la productividad de sus trabajadores.

Como resultado de lo anterior, la tecnología industrial ha echado raíces en muchas partes; ha desaparecido la dependencia mundial de la capacidad manufacturera y el progreso técnico respecto de un puñado de naciones industrializadas. Las fuentes de abastecimiento abarcan casi todo el planeta; productos electrónicos malayos, automóviles coreanos, fármacos suizos y tejidos chinos inundan los mercados occidentales. Ello representa un cambio histórico, que además será permanente. No resulta realista creer que los Estados Unidos o cualquier otro país pueda modificar unilateralmente esta situación, a pesar de que algunas empresas han empezado a tomar conciencia de los riesgos que entraña la concesión de patentes para la explotación de tecnología valiosa. Los gobiernos están adoptando también medidas más rigurosas de protección de la propiedad intelectual de sus ciudadanos, tema de particular importancia cuando son tantas las tecnologías interesantes pendientes de explotación.

Hoy, los flujos transnacionales de dinero penetran de forma instantánea en casi cualquier mercado del mundo, con lo cual las políticas económicas nacionales quedan expuestas a la influencia de poderosas fuerzas de mercado externas. De hecho, las transacciones en valores financieros superan ampliamente, en una proporción hasta de 20 a 1, a los flujos comerciales de bienes y servicios. No es exagerado afirmar que, desde 1979, los tipos de cambio monetario se han convertido en un importante elemento motor de la economía norteamericana. Ello se debe a que siempre que aumenta la demanda de dólares (como sucedió a principios de la década de 1980, cuando los tipos de cambio eran altos en los Estados Unidos), crece también su valor en relación con las demás monedas. Ello se traduce en un encarecimiento relativo de las exportaciones norteamericanas (con precios ligados al valor del dólar) y una afluencia masiva de importaciones de muchos países. Resultado final de todo ello es que los productos extranjeros conquistan porciones importantes de los mercados interiores, debilitando la posición de muchas empresas nacionales, hasta el punto de llevar a algunas a la quiebra.

Tal era la situación hasta ayer mismo, que se tradujo en un déficit récord de 171.000 millones de dólares en la balanza comercial de mercancías (la diferencia entre las exportaciones y las importaciones de bienes) en 1987. La llamada balanza de operaciones corrientes, que incluye además el valor de partidas como el pago de servicios internacionales, la repatriación de ganancias, las regalías cobradas en el extranjero y los intereses sobre la deuda exterior, presentó un saldo ligeramente más favorable, con un déficit de 161.000 millones de dólares. Y el sistema financiero mundial continuará ejerciendo una importante influencia sobre las políticas económicas nacionales mientras se mantenga la flotación de los tipos de cambio.

La enorme liquidez de los empréstitos tomados en los mercados financieros internacionales ha tenido como consecuencia un asombroso incremento del endeudamiento de los Estados Unidos con otros países. En el Informe económico del presidente de 1987 se indica que al menos el 50 por ciento de las inversiones netas realizadas en su suelo procedieron del extranjero, debido principalmente a que las empresas norteamericanas no pueden contar con el ahorro nacional para las inversiones de capital. (Mientras que las inversiones netas realizadas en 1987 representaron el 5,3 por ciento del PIB, el ahorro interior neto fue inferior al 2 por ciento del PIB.) Si se mantiene este flujo de entrada de capitales, el coste del servicio de la deuda exterior y del pago de dividendos a los titulares extranjeros de acciones norteamericanas impondrá, en pocos años, duras cortapisas al crecimiento económico de los Estados Unidos. Sin embargo, mientras la tasa de ahorro nacional siga resultando insuficiente para cubrir la inversión productiva dentro del país, deberán completarse con capitales venidos de fuera los fondos de inversión disponibles (lo cual supone elevar los tipos de interés). En resumen, los Estados Unidos han consumido demasiado, han producido demasiado poco y han mantenido su nivel de vida endeudándose en el extranjero.

El saldo negativo de la balanza de operaciones corrientes de los Estados Unidos (que representa alrededor del 3,5 por ciento del PIB del país) refleja

este desequilibrio de fondo entre la inversión y el ahorro nacionales. Para poner remedio a esta situación, es preciso que aumente el ahorro o disminuya la inversión. Lo segundo sería catastrófico; por tanto, la única opción realista es fomentar un incremento sistemático del ahorro, asegurándose de que el gasto público no supere la tendencia al ahorro de los particulares. (Aunque la caída del valor del dólar desde 1985 ha aliviado un poco la situación, no será suficiente para superarla.) El objetivo debería fijarse en la adopción de medidas reguladoras del consumo que aseguren que, en un año cualquiera, su incremento resulte inferior en un uno por ciento a la tasa de incremento del producto, lo cual permitiría incrementar la tasa de ahorro neto en una media del uno por ciento anual. De este modo, en un plazo de entre ocho y 10 años, la tasa de ahorro neto alcanzaría los índices de dos cifras habituales entre sus competidores internacionales.

Dadas las dimensiones de la economía estadounidense, cualquier cambio del consumo o el ahorro repercutiría sobre muchas naciones de todo el mundo, un aspecto que debe tenerse en cuenta al reducir los déficits comerciales y presupuestarios. En este sentido, el sobreconsumo y la subproducción de los últimos tiempos han beneficiado al resto del mundo, al posibilitar la venta en Estados Unidos de los bienes y servicios producidos por muchos países menos desarrollados y atenazados por la deuda exterior. Sin embargo, ha llegado el momento de que los Estados Unidos revisen sus prioridades y actúen para sentar las bases de un mayor crecimiento de la economía mundial a largo plazo.

Los cambios irrevocables del mercado global aquí descritos plantean enormes dificultades de nuevo orden, sobre todo para los empresarios norteamericanos que adquirieron su experiencia durante los primeros decenios de la postguerra, cuando los Estados Unidos dominaban los mercados mundiales y se enfrentaban con escasa o ninguna competencia en los mercados interiores. El comercio internacional ha pasado, de una situación en la cual los países podían contar con ventajas comparativas estables a largo plazo, a otra de carácter dinámico con continuas variaciones de las ventajas comparativas. Desde la década de 1970 ello ha obligado a los empresarios de todo el mundo industrial a dedicar buena parte de su tiempo a subsanar las consecuencias de las fuertes fluctuaciones de los precios mundiales de los productos energéticos, de los tipos de cambio y de las tasas de inflación. Los impedimentos creados por las influencias externas han determinado que los buenos administradores de empresas se las viesen y deseasen para coordinar las exigencias a corto plazo con la planificación estratégica de más largo alcance, que es la base de la expansión y prosperidad de una empresa.

En la presente situación económica, hay cabida, dentro de una estrategia general orientada a mejorar el crecimiento económico de los Estados Unidos, para acciones comerciales selectivas que hagan frente a ejemplos claros de proteccionismo extranjero. Sin embargo, estas medidas deberían aplicarse para abrir nuevos mercados foráneos, y no para cerrar el norteamericano. De hecho, los Estados Unidos cuentan ya con un formidable arsenal de medidas proteccionistas, en forma de subvenciones, precios de partida, cupos y aranceles. Gary Hofbauer, de la Universidad de Georgetown, calcula que en 1986 alrededor del 25 por ciento de las importaciones se hallaban cubiertas por algún tipo de protección (frente a un 8 por ciento en 1975). Aunque estas medidas se consideran "transitorias", sus repercusiones sobre el crecimiento a largo plazo pueden tener una significación mucho más amplia. En efecto, las empresas podrían quedar desvinculadas de los avances tecnológicos y la evolución económica a escala mundial, con la consiguiente reducción de la presión en favor de la autosuperación.

La competitividad internacional adquiere su verdadero significado cuando no representa un fin en sí misma, sino un medio para incrementar los índices de crecimiento a largo plazo y posibilitar con ello la creación de empleo y la mejora del nivel de vida. Para alcanzar estos objetivos, los Estados Unidos tienen que recuperar un índice medio anual de crecimiento real del PIB a largo plazo equivalente al menos a su media histórica (para el período 1870-1984) del 3,39 por ciento. De momento la meta debería fijarse en un índice de crecimiento del 3,5 por ciento, pues podría ser que debiera destinarse hasta un 1 por ciento del mismo a pagar las deudas creadas por el despilfarro anterior. Una vez descontado el gravamen potencial de un 1 por ciento en concepto de servicio del capital exterior y una ampliación del 1 por ciento en la fuerza de trabajo durante la próxima década (por debajo del crecimiento máximo del 2,9 por ciento anual registrado entre 1976 y 1980), el crecimiento real del PIB per cápita sería de aproximadamente un 1,5 por ciento anual.

Resultará imposible alcanzar tal crecimiento del 1,5 por ciento del PIB real per cápita sin algún apoyo del gobierno, pero éste debe limitarse fundamentalmente a la creación de un clima macroeconómico favorable para el crecimiento a largo plazo. Una intervención generalizada del gobierno en los mercados interiores sería contraproducente. Muchas personas, del gobierno o no, han comenzado ya a esgrimir la idea de "competitividad" como un término cifrado para designar la manipulación oficial de la industria al viejo estilo. Pero todo intento de dirección del sector privado por parte del gobierno se vería desbordado por las condiciones de cambio continuado que impone el rápido ritmo de renovación tecnológica.

Sólo un incremento de la inversión en capital y en tecnología en todos los sectores de la economía norteamericana (y sobre todo en el sector industrial), unido a un perfeccionamiento cualitativo de la fuerza laboral en toda su escala, permitirá mejorar el nivel de vida a un ritmo aceptablemente rápido. Los Estados Unidos gozan de algunas ventajas históricamente demostradas dentro del mercado mundial que ha alcanzado altas cotas de competitividad, pero es preciso encarar la situación con una visión a más largo plazo y procurar el logro anual de esos incrementos aparentemente triviales de unas cuantas centésimas del índice de crecimiento económico.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE POSITIVE SUM STRATEGY: HARNESSING TECHNOLOGY FOR ECONOMIC GROWTH. Dirigido por Ralph Landau y Nathan Rosenberg. National Academy Press, 1986.

TECHNOLOGY AND ECONOMIC POLICY. Dirigido por Ralph Landau y Dale Jorgenson. Ballinger Publishing Company, 1986.

PRODUCTIVITY AND U.S. ECONOMIC GROWTH. Dale Jorgenson, Frank M. Gollop y Barbara M. Fraumeni. Harvard University Press, 1987.

GROWTH AND SLOWDOWN IN ADVANCED CAPITALIST ECONOMIES: TECHNIQUES OF QUANTITATIVE ASSESSMENT. Angus Maddison en *The Journal of Economic Literature*, vol. 25, nº 2, págs. 649-698; junio de 1987.

Activación de los oncogenes por radiación y agentes químicos

El diseño de modelos que reproducen, en animales, la activación de ciertos oncogenes permitirá estudiar el proceso a través del cual un carcinógeno desencadena la formación de un tumor

Javier León, Isabel Guerrero y Angel Pellicer

Tras el descubrimiento de los antibióticos y las vacunas y el espectacular avance de la cirugía, el cáncer sigue constituyendo una de las grandes amenazas que se resiste a revelarnos su misterio a pesar del enorme empeño investigador puesto en ello. Las razones de ese desconocimiento hay que buscarlas en la propia complejidad de la enfermedad, que, por ser una subversión de la maquinaria celular, refleja la complejidad de la célula misma. Añádase, además, el polimorfismo del proceso canceroso, con su centenar largo de tipos en la especie humana, que se distinguen por su tejido de origen, edad de aparición, velocidad de crecimiento y otros factores.

En líneas generales, cáncer es sinónimo de crecimiento descontrolado de un grupo de células que no obedece los controles de proliferación y diferenciación que rigen en todos los tejidos de un organismo. El tumor puede originarse en una célula que ha sufrido la acción de un carcinógeno. La acción del carcinógeno sobre una o varias células constituye la llamada fase de iniciación de la carcinogénesis. Algunas de esas células alcanzadas por el carcinógeno comienzan a proliferar en respuesta a agentes endógenos o exógenos: los promotores de tumores. Con el tiempo, forman un pequeño amasijo celular. Nos hallamos entonces en la fase de promoción. No todas las substancias que inducen la promoción de un tumor tienen capacidad de iniciarlo, aunque la mayoría de los capacitados para iniciarlo sí pueden, también, promoverlo.

Tras la proliferación primaria, se llega a la formación de un tumor benigno o de un tumor maligno; en el primer caso, el tumor no se propaga, no es invasivo, y las células que lo componen están bastante diferenciadas. En el caso del tumor maligno, las células se parecen ya menos a las del tejido de procedencia, proliferan rápidamente invadiendo los tejidos adyacentes y, con frecuencia, están capacitadas para producir metástasis. Las transformaciones que convierten la proliferación celular original en un tumor maligno e invasivo reciben la denominación general de progresión del tumor. Ese carácter invasivo por vía linfática o sanguínea, con producción de metástasis, suele provocar la muerte del enfermo de cáncer. Los tumores benignos, por contra, quedan localmente confinados, aunque alcancen a veces gran tamaño que puede comprometer la vida del paciente y evolucionar hacia formas malignas.

El estudio del origen de los tumores y la investigación sobre las alteraciones celulares que son responsables del paso de un tumor benigno a otro maligno, y de éste a la producción de metástasis, han centrado el interés de los oncólogos durante muchos años. Pero sólo recientemente, con el descubrimiento de los oncogenes, se ha producido un avance significativo en nuestro conocimiento de los mecanismos moleculares del cáncer.

El primer hallazgo importante sobre el origen del cáncer ocurrió en el siglo XVIII y fue mérito del médico inglés Sir Percival Pott. En 1775 advirtió la alta incidencia de cáncer de escroto que se observaba en los deshollinadores londinenses, a pesar de ser, en su mayoría, muy jóvenes; atribuyó la causa del mal al hollín. Además de identificar una causa concreta del cáncer, la observación de Pott señalaba un producto químico como el responsable desencadenante.

Desde los tiempos de Pott se ha avanzado muy despacio en la búsqueda de agentes químicos causantes del cáncer. Hoy sabemos de otras substancias implicadas, como las anilinas en los tumores de vejiga urinaria o el tabaco en el cáncer de pulmón. Por otra parte, a principios del siglo XX se estableció un vínculo claro entre el cáncer y un grupo de agentes físicos: las radiaciones. Relación que se había ya sospechado cuando algunos de los pioneros de las investigaciones de las radiaciones en el laboratorio murieron de cáncer, entre ellos Marie Curie y su hija. Más tarde se confirmó su alta incidencia entre los trabajadores de las minas de uranio. Si bien la demostración más trágica de esa estrecha relación entre radiación y cáncer vendría con las explosiones de Hiroshima y Nagasaki.

La capacidad de los agentes químicos y físicos de inducir cáncer se descubrió, pues, por vía epidemiológica. Pero conviene recordar que, en 1911, Peyton Rous, del Instituto Rockefeller de Investigaciones Médicas de Nueva

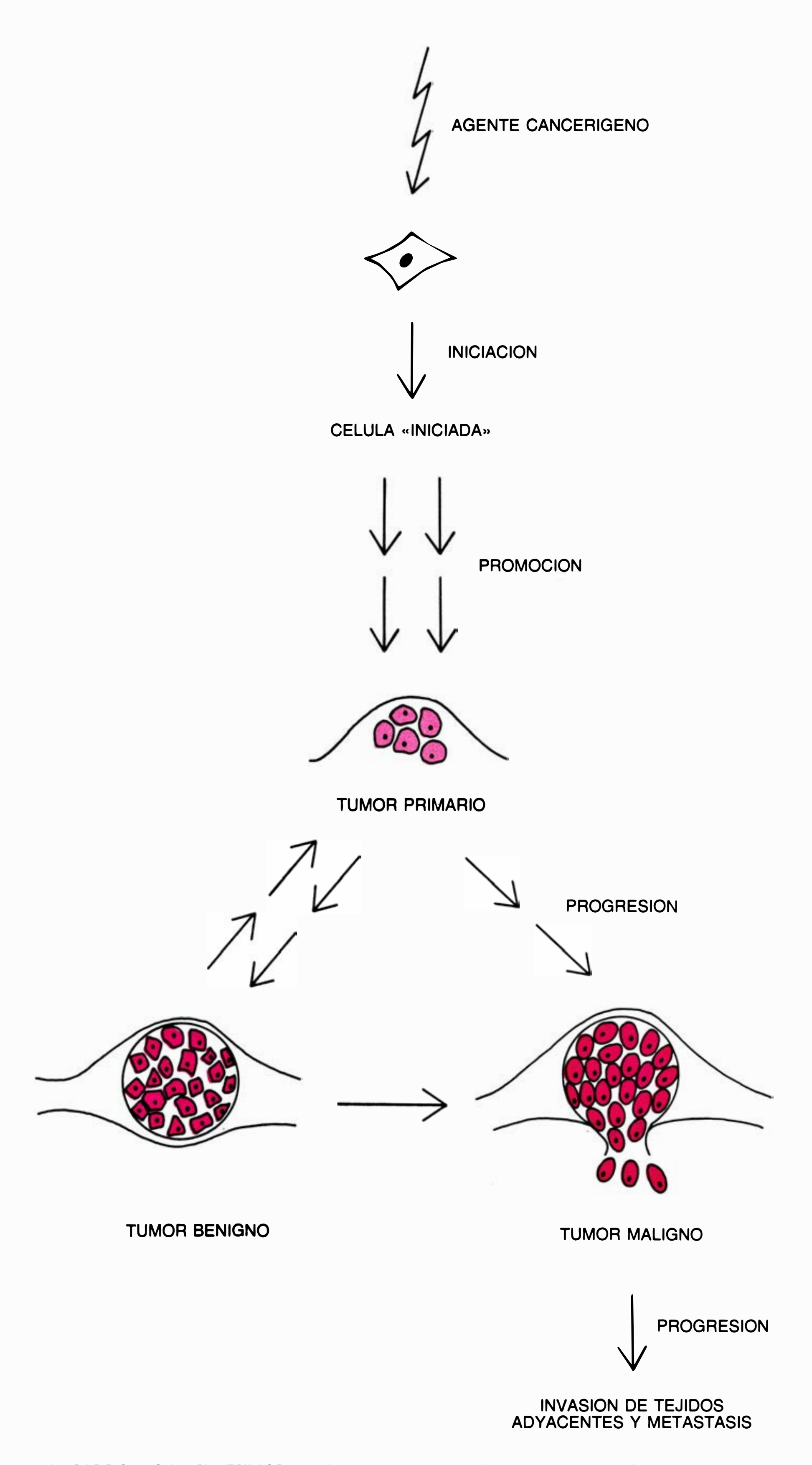
ANGEL PELLICER, ISABEL GUERRERO y JAVIER LEON trabajan en genética molecular. Pellicer cursó estudios de medicina en la Universidad de Valencia. Se doctoró en 1976. Se trasladó luego a la Universidad de Columbia en Nueva York y en 1980 pasó al Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York, donde en la actualidad es profesor de patología. Guerrero se doctoró en químicas por la Universidad Autónoma de Madrid en 1981. Tras una estancia en el departamento de patología de la Universidad de Nueva York se incorporó al grupo de genética del desarrollo de la Universidad de Oxford. León se licenció en farmacia y en biológicas por la Universidad Complutense, doctorándose por la de Santander en 1983. Tras una etapa postdoctoral en el departamento de patología de la Universidad de Nueva York, se convirtió en profesor de biología molecular de la Universidad de Cantabria.

York, había demostrado la existencia de un virus infeccioso, capaz de producir sarcomas en pollos. Casi sesenta años más tarde, Hidesaburo Hanafusa, de la Universidad Rockefeller, demostró que la tumorigenicidad debíase a un solo gen del virus, hoy llamado *src* (de sarcoma). Así quedó demostrada la base genética de un proceso tumoral, algo que se infería de la predisposición hereditaria (para algunos cánceres) y de las frecuentes anomalías cromosómicas en células cancerosas.

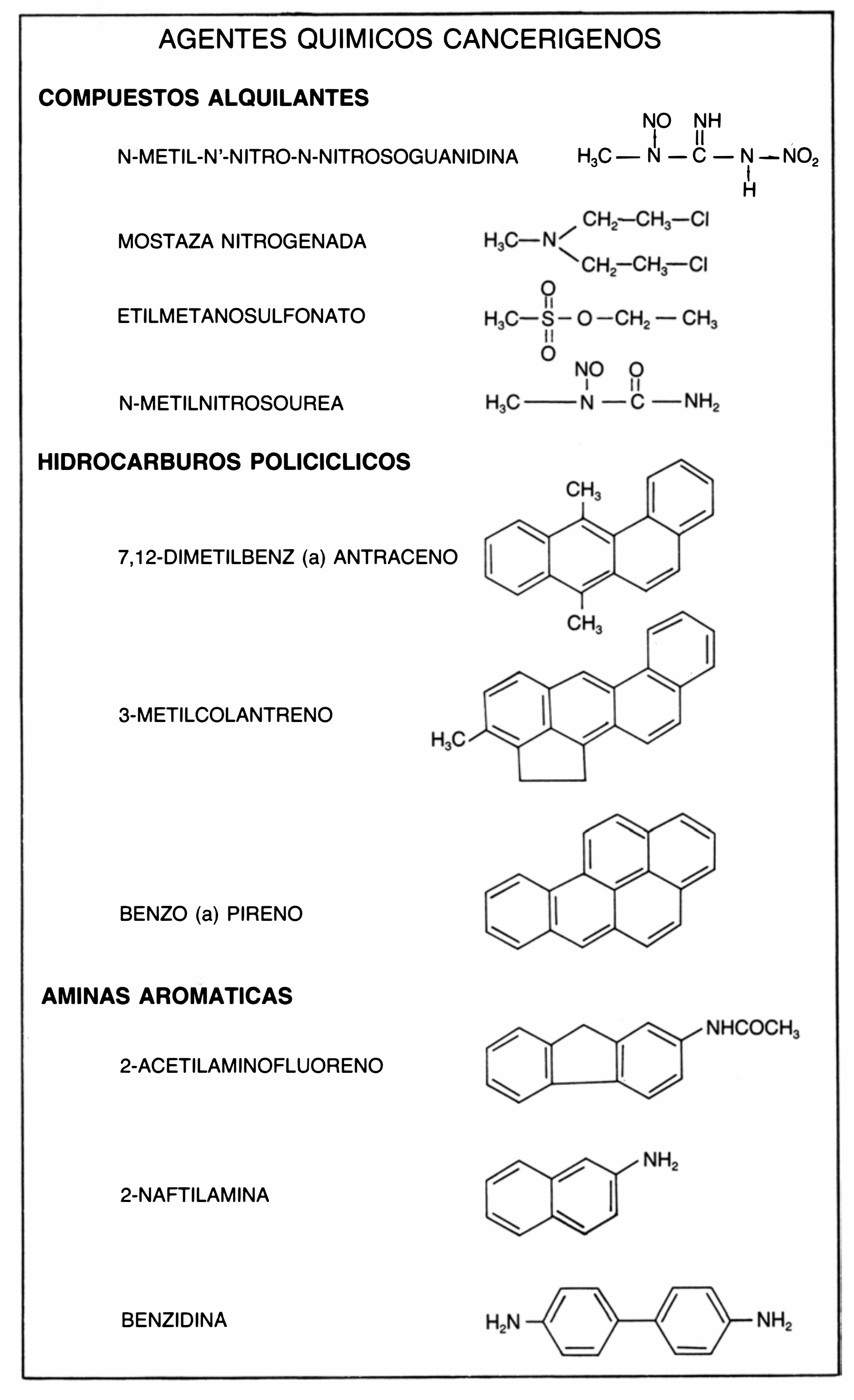
Una vez establecido que la transformación maligna es un proceso de naturaleza genética en el caso de los virus tumorigénicos, había que determinar por qué mecanismo los agentes cancerígenos lograban alterar el programa genético de la célula.

El material genético está constituido por ácido desoxirribonucleico, o ADN. Se trata de una doble cadena compuesta por nucleótidos. Cada nucleótido, además de fosfato y desoxirribosa, posee una base nitrogenada: adenina, guanina, timina o citosina. La secuencia de los cuatro nucleótidos a lo largo de las cadenas de ADN determina la secuencia y, por tanto, la estructura y la función, de las proteínas celulares. Los cambios en el ADN de un organismo, las *mutaciones*, se agrupan en cuatro tipos: puntuales, si se trata de la sustitución de una base por otra; deleciones, si se pierden una o varias bases; inserciones, si se agregan una o varias bases, y translocaciones, cuando se produce la transferencia de un trozo de ADN desde un cromosoma hacia otro.

El estudio de la interacción directa o indirecta entre los agentes físicoquímicos y el ADN, así como la búsqueda de sistemas de ensayo donde medir la capacidad de las distintas substancias para provocar mutaciones, polarizan hoy la atención de los científicos. El número de substancias que han demostrado su capacidad mutagénica es elevado, destacando, desde el punto de vista químico, los hidrocarburos policíclicos aromáticos, las aminas aromáticas y los compuestos alquilantes. Importa conocer que muchas de estas moléculas no son mutagénicas de suyo, sino que adquieren ese carácter a raíz de su "activación" metabólica por distintas enzimas en el hígado que promueven, en aquéllas, epoxidaciones, hidroxilaciones o deaminaciones. Por último, aparte de la estructura química de la substancia y de las modificaciones metabólicas que pueda sufrir, desempeña un papel determinante en la mutagénesis la capacidad de la célula para



1. DESARROLLO DE UN TUMOR: comienza con la intervención de un agente carcinogénico sobre una célula; el programa genético queda entonces alterado (*arriba*). La célula que lo sufre deviene, en ese momento, "iniciada" y el proceso recibe la denominación de iniciación del tumor. De esas células iniciadas, habrá alguna que, en respuesta a la acción de una serie de promotores de tumores, comience a proliferar; se formará un amasijo celular o tumor primario. Este proceso de promoción, así se llama, pueden inducirlo agentes endógenos (hormonas o factores de crecimiento) o factores externos. Los agentes cancerígenos pueden ejercer también actividad promotora. Mientras que la iniciación tiene lugar en un solo paso, la promoción constituye verosímilmente un proceso multifásico. El tumor primario puede proliferar y convertirse en un tumor benigno (*abajo, a la izquierda*) o en un tumor maligno (*abajo, a la derecha*). El proceso de progresión del tumor maligno continúa posteriormente con la invasión de los tejidos adyacentes y producción de metástasis.



2. FORMULAS ESTRUCTURALES de tres de los principales grupos de compuestos químicos cancerígenos: compuestos alquilantes (*1*), hidrocarburos aromáticos policíclicos (*2*) y aminas aromáticas (*3*).

reparar la lesión inicialmente producida en el ADN. De esta reparación se encargan enzimas especializadas que van sustituyendo las bases incorrectamente copiadas durante la replicación del ADN o religando cadenas de ADN que se hubieran cortado.

Con respecto a los agentes físicos, hemos aludido a la relación entre radiaciones y cáncer. Se sabe que las radiaciones de longitud de onda corta (inferior a 5×10^{-5} centímetros), como la ultravioleta, rayos X y rayos gamma, son las más carcinogénicas. Los electrones, neutrones y partículas alfa, dotados de alta energía, poseen también capacidad carcinogénica. ¿Cómo actúan esos agentes? La radiación ultravioleta a la que uno se expone al recibir los rayos solares produce una alteración característica en el ADN que consiste en la formación de dímeros entre dos bases consecutivas de la misma cadena. Las radiaciones ionizantes (rayos X, gamma y partículas) intervienen directamente sobre el ADN o reaccionan con otras moléculas de la célula que, al ionizarse, reaccionan entonces con el ADN. Esas radiaciones producen radicales hidroxilo (OH^-) y peróxido (O_2^-) al ionizar el agua, cuyo resultado final puede ser la rotura de las cadenas del ADN. Cuando esto último ocurre, la reparación de las mismas resulta difícil y en vez de ello se asiste a una deleción o translocación de un fragmento de ADN, que se incardina en un lugar distinto del cromosoma del que originalmente ocupaba. Aunque este es el mecanismo más socorrido a la hora de explicar el efecto mutagénico de las radiaciones, su capacidad de producir mutaciones puntuales no debe desdeñarse. Lo veremos más adelante.

Los agentes carcinogénicos artificiales que hay en el ambiente no son los únicos responsables de la enfermedad. La exposición a radiaciones ionizantes de los rayos cósmicos o de isótopos radiactivos naturales es constante. Y lo propio cabe decir de los carcinógenos químicos, pues existen multitud de sustancias naturales empleadas en diversos materiales o incorporadas en los alimentos dotadas de capacidad oncogénica. Por citar algunos ejemplos de sustancias carcinogénicas naturales, identificadas, recordemos: en el tocino frito, la dimetilnitrosamina; en los champiñones, las hidrazinas; los compuestos de cromo y níquel, etcétera. La proporción exacta en que contribuyen los agentes naturales y los artificiales en la incidencia del cáncer constituye todavía objeto de debate y demanda un esfuerzo especial de investigación epidemiológica y básica.

La importancia de la mutagénesis en el origen del cáncer llevó al diseño de ensayos rápidos para determinar la capacidad mutagénica de los productos químicos. A Bruce Ames, de la Universidad de California en Berkeley, debemos el más famoso. El test de Ames consiste, a grandes rasgos, en tratar con la sustancia a ensayar un cultivo de una cepa mutante de *Salmonella* que carezca de cierto gen codificador de una enzima necesaria para la síntesis de la histidina; es decir, la cepa mutante no puede medrar en un cultivo privado de ese aminoácido. Ahora bien, una substancia química podría provocar, en el mismo gen, una mutación, de suerte que el fenotipo de *Salmonella* revertie-

ra a su condición original, al codificar de nuevo la enzima necesaria y permitiendo así el crecimiento en un medio sin histidina. Mediante la comparación del número de colonias revertientes con el número de colonias control adecuadas, se puede determinar la capacidad mutagénica de la sustancia sujeta a ensayo.

Aunque este tipo de pruebas permite identificar con relativa facilidad las substancias mutagénicas, hay que señalar que no todos los productos que inducen tales cambios son necesariamente cancerígenos. Desde la ingestión de una substancia hasta que ésta actúa sobre el ADN de las células media un proceso complejo, en el que intervienen muchos factores. Además, los sistemas reparadores del ADN pueden hacer que un compuesto mutagénico según el test de Ames no produzca transformación oncogénica en células animales.

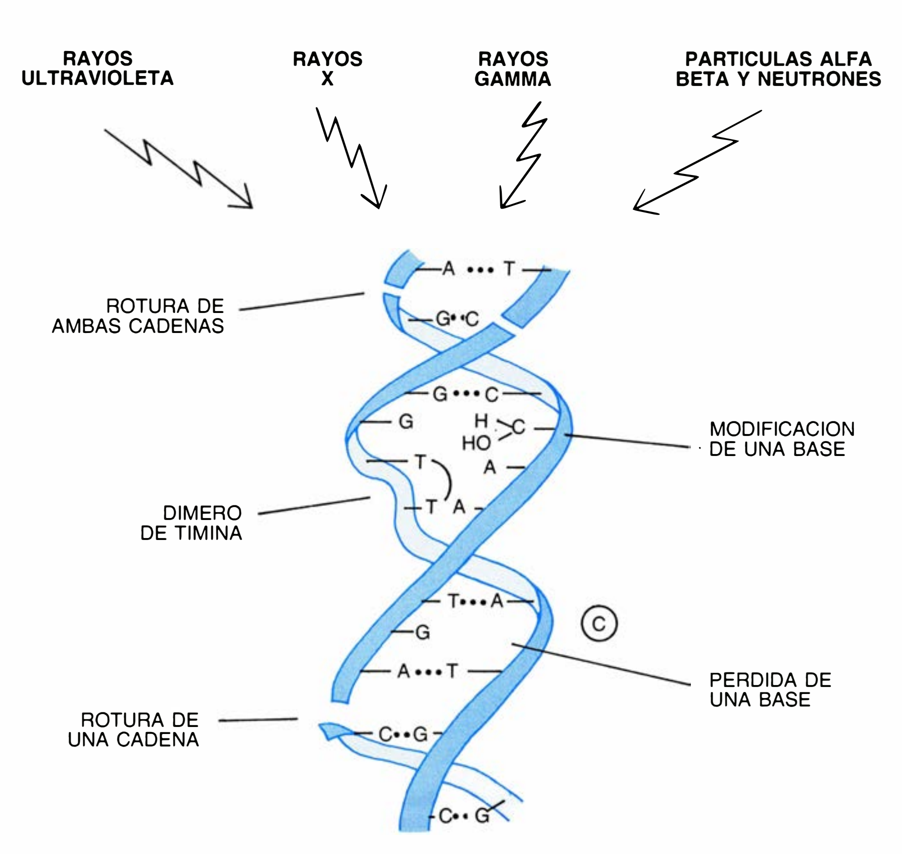
¿Cómo relacionar la capacidad de inducir mutaciones con la de provocar tumores? La historia de la respuesta a esa cuestión comenzó con los experimentos de tratamiento de células en cultivo de mamífero con agentes cancerígenos; se observó entonces que algunas células sufrían una "transformación" por la que adquirían propiedades típicas de células tumorales: las células crecen sin control, pierden la inhibición por contacto (y así constituyen "focos" sobre la monocapa de células normales), cambian de morfología, medran sin adherirse a un substrato sólido (en agar, por ejemplo) y dan lugar a la formación de tumores cuando se inyectan en animales de experimentación. Ese tipo de ensayos se refinaron para posibilitar el análisis de substancias presumiblemente cancerígenas en modelos más reales. Otros ensayos de mutagenicidad en células eucariotas se fundan en la determinación de la actividad de enzimas reparadoras de ADN en células en cultivo tras la administración del carcinógeno a comprobar.

No obstante su obvia utilidad, las investigaciones con cultivos celulares no constituyen el modelo idóneo para el estudio molecular de la carcinogénesis, dada la enorme distancia entre la célula aislada y el organismo entero, y en su respectiva respuesta a la acción de los agentes físico-químicos. Se han diseñado, por eso mismo, modelos animales para determinar la actividad carcinogénica de los diversos agentes.

El cáncer es una enfermedad que se presenta de múltiples formas, según el tejido donde se origine. Ello ha obligado a la creación de distintos modelos que puedan abarcar ese polimorfismo. En este sentido, se han puesto a punto modelos de carcinogénesis epitelial donde se inducen tumores (papilomas, carcinomas, queratoacantomas), en la piel de ratones y conejos con hidrocarburos policíclicos aromáticos y en la de ratas con radiaciones. Otros modelos recurren a la inducción de adenocarcinomas mamarios y tumores de sistema nervioso en rata con N-etilnitrosourea (ENU), linfomas de timo en ratón con otro agente alquilante similar, N-metilnitrosourea (NMU) y con radiación gamma, tumores renales en rata y plasmacitomas de ratón con otros carcinogénos químicos. Modelos que se han empleado para estudiar el desarrollo de la activación oncogénica en los procesos naturales.

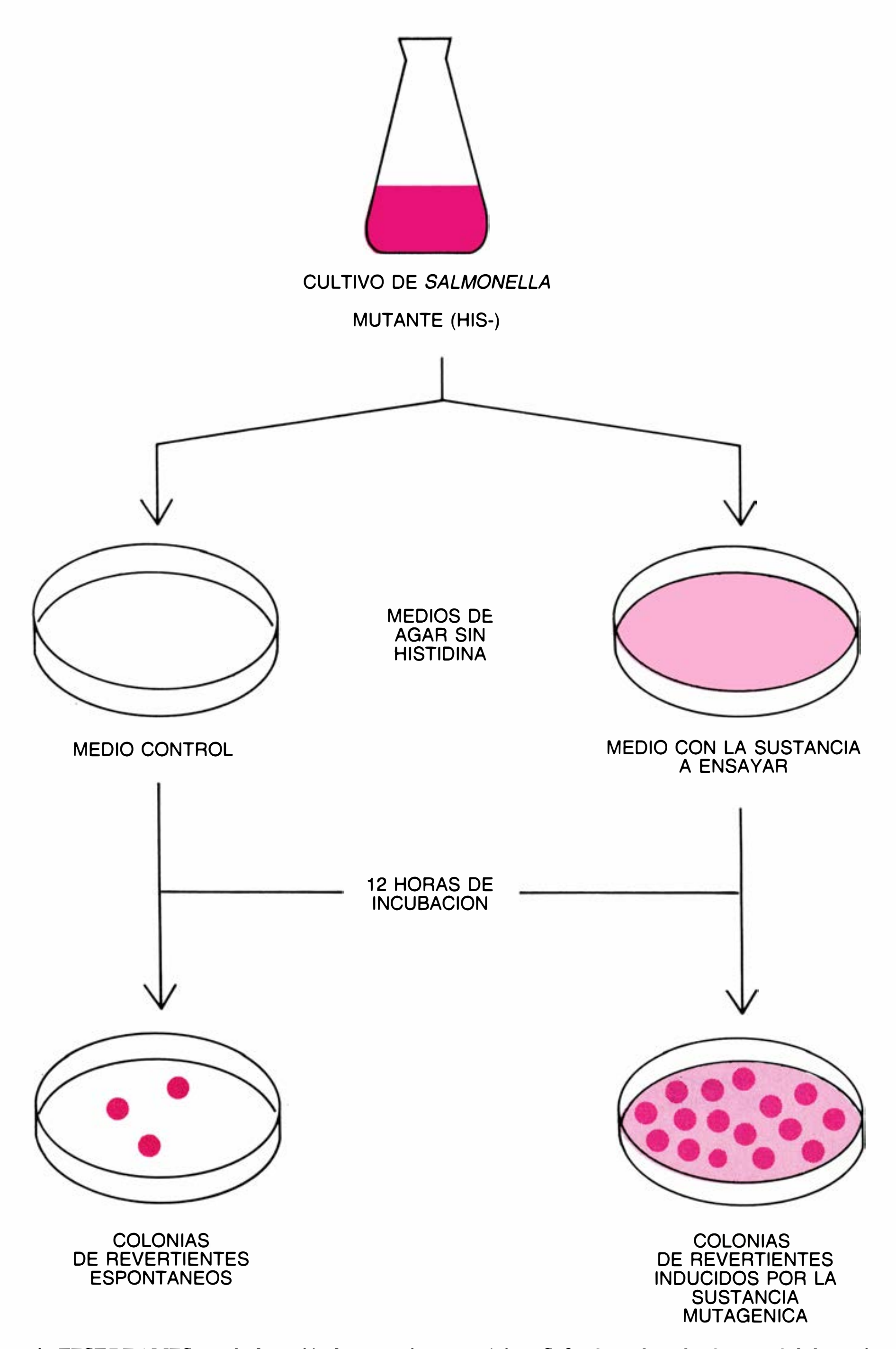
Ha sido en este punto donde los avances de la genética molecular realizados en los últimos años han aportado nueva luz sobre los procesos biológicos que conducen al cáncer. Dijimos antes que los agentes carcinogénicos interaccionaban con el ADN y producían mutaciones. Pues bien, aunque eso se sabía desde bastante tiempo atrás, no pudo determinarse específicamente hasta la década de los setenta qué genes eran los que se hallaban alterados en los tumores. Genes que han recibido el nombre de *oncogenes*. Se han caracterizado ya una cuarentena de ellos.

La identificación de los primeros oncogenes se produjo a partir de retrovirus que inducían tumores en animales. Los retrovirus son virus cuyo genoma consta de ácido ribonucleico, y no de ADN. Dominique Stehelin, Harold Varmus y J. Michael Bishop, de la Universidad de California en San Francisco, demostraron en 1976 que el gen *src*, responsable de la naturaleza tumoral del sarcoma de Rous, no era un gen propio del virus, sino que resultaba casi idéntico a otro gen presente en el genoma del pollo y que lo había incorporado el virus; es sabido que una fase del ciclo vital del virus consiste en integrarse en el genoma de la célula huésped.



3. ALTERACIONES EN EL ADN producidas por las radiaciones. Los distintos tipos de radiación se ordenan, de mayor a menor energía, en la parte superior de la ilustración (*de izquierda a derecha*): radiación ultravioleta, rayos X, radiación gamma y radiación particulada (partículas alfa, beta y neutrones). La energía de la radiación se relaciona, salvo alguna excepción, con la mayor capacidad mutagénica. Esas radiaciones provocan alteraciones muy diversas en el ADN: dímeros de timina, deleciones y roturas de las cadenas.

Pronto se fue haciendo evidente que muchos tumores que no eran de origen vírico manifestaban, sin embargo, una estructura o una expresión alterada de esos genes, alteraciones que han recibido la denominación común de *activación* oncogénica. En su forma no tumorigénica, estas secuencias de ADN presentes en las células normales responden al nombre de *proto-oncogenes*. Así, el término *oncogén* se reserva para la forma activada de esos genes. Se buscaron luego alteraciones genéticas en tumores no inducidos por retrovirus; llegóse al descubrimiento de multiplicaciones génicas (o amplificaciones, por emplear el barbarismo al uso), reordenaciones de secuencias de ADN, mutaciones puntuales y aumento de la expresión de genes cuya presencia en virus no se había detectado antes, como los genes N-*ras*, N-*myc*, *neu*, etcétera.



4. TEST DE AMES para la detección de sustancias mutagénicas. Se funda en el empleo de cepas de la bacteria *Salmonella typhimurium* que necesitan la presencia de histidina en el medio para crecer, pues tienen alterado uno de los genes que determinan la biosíntesis de dicho aminoácido. Las bacterias se cultivan en medios privados de histidina, aunque sí poseen la substancia a ensayar. Si esta sustancia es mutagénica, producirá mutaciones al azar en todo el genoma de la bacteria, incluidos los genes de biosíntesis de histidina. Algunas de estas mutaciones implicarán la aparición del fenotipo normal, al ser activa la nueva enzima generada por la mutación. La potencia mutagénica de la sustancia se puede cuantificar por el número de colonias de revertientes (es decir, bacterias que adquieren el fenotipo normal) que crecen en medios sin histidina.

Esta correlación entre la presencia de genes alterados y el estado tumoral pudo demostrarse gracias al desarrollo de técnicas de transferencia de ADN, que pemitían introducir ADN purificado en células animales en cultivo. Dichas técnicas abrieron una nueva era en el campo de la oncología molecular, al facilitar la incorporación de un gen de las células donantes en el genoma de las células receptoras. Se ha detectado así la presencia de oncogenes que, sin hallarse en los retrovirus tumorales, están capacitados para producir un fenotipo transformado cuando se les transfiere a una célula indicadora.

En el marco de esas nuevas técnicas, se demostró que el ADN procedente de muy distintos tumores portaba oncogenes activados y que una gran mayoría de los detectados pertenecían a la familia de los oncogenes *ras*, denominación que recibieron por haberse aislado del virus del sarcoma de rata. La familia cobija varios miembros: H-*ras*, K-*ras* y N-*ras*. El último de los cuales no se aisló de ningún retrovirus, sino que se identificó y clonó a partir de una línea celular derivada de un neuroblastoma humano. Todos los genes *ras* determinan una proteína similar que parece cumplir, en los procesos de proliferación y diferenciación celular, la función de transductora de señales.

¿Cuáles son los mecanismos que convierten un proto-oncogén normal en un gen activado? Desde el punto de vista funcional, se distinguen dos mecanismos de activación oncogénica: el que da lugar a un cambio estructural en la proteína determinada por el gen y el que altera la expresión del proto-oncogén, porque la refuerce o porque discurra en fases inadecuadas del proceso de diferenciación celular.

Desde el punto de vista genético, los mecanismos que convierten un proto-oncogén en un gen activado son los siguientes: mutaciones puntuales, inserciones de secuencias nuevas, deleciones de secuencias, translocaciones y multiplicaciones (o amplificaciones). Veamos uno a uno. Las mutaciones puntuales sustituyen una base de ADN por otra. Este es el mecanismo de activación en los oncogenes *ras*. Dichas mutaciones suponen un cambio de aminoácido en posiciones críticas (por lo común, los aminoácidos 12 o 61 de la proteína *ras*), de modo que se modifican sus propiedades biológicas. La nueva proteína es capaz de transformar

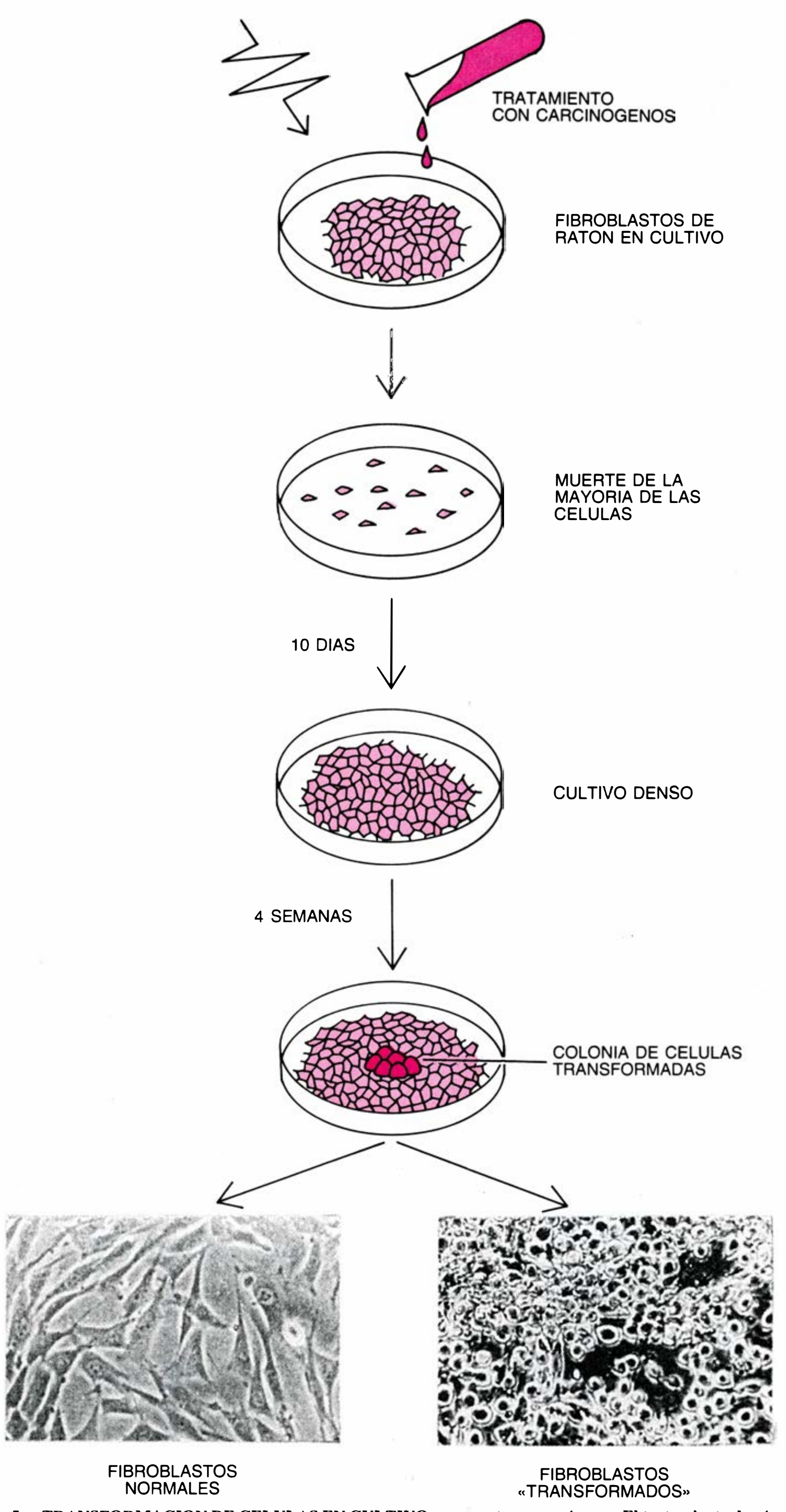
una célula normal en otra con caracteres oncogénicos. Se ha descrito el mismo mecanismo para el oncogén *neu*, que determina una proteína similar al receptor del factor de crecimiento epidérmico. Por inserción de secuencias nuevas se activan los oncogenes c-*myc*, *int-1*, *int-2* y *mos*.

Las deleciones de secuencias de ADN del gen pueden ser parciales o totales. Entre las primeras se inscribe el oncogén *erb-B1*, cuyo proto-oncogén determina o codifica el receptor del factor de crecimiento epidérmico (ubicado en la membrana celular) y que se activa por la deleción de las secuencias del gen que determinan la parte extracelular del receptor. La proteína queda así fijada en una conformación de estímulo constante, en ausencia incluso del factor de crecimiento, lo que desencadena la transformación celular. Las deleciones totales afectan a un grupo de oncogenes recesivos, llamados también supresores. La deleción de ambos alelos del gen desencadena el retinoblastoma y el tumor de Wilms (un tipo de tumor renal).

Se han descubierto translocaciones de fragmentos del gen en varios oncogenes. Por citar los más conocidos: el oncogén c-*myc* en el linfoma de Burkitt, el *abl* y *bcl*−2 en leucemias y el *trk* en un sarcoma. La translocación produce un proto-oncogén truncado que a veces no afecta a su parte codificante (de modo que la proteína es la misma), pero sí su expresión (c-*myc* y *bcl*−2), mientras que en otros casos la translocación provoca la aparición de una proteína nueva híbrida (*abl* y *trk*).

La multiplicación génica consiste en la repetición reiterada del número de copias del proto-oncogén, muy por encima de las dos copias presentes en las células normales (que son diploides), de suerte que la cantidad de proteína determinada por el gen se halla también aumentada. Mecanismo de activación que presentan dos oncogenes de la familia *myc*: c-*myc* en cánceres microcíticos de pulmón y N-*myc* en neuroblastomas, así como *erb-B1* en glioblastomas y *myb* en leucemias mieloides agudas.

Los productos de los proto-oncogenes son, pues, proteínas que intervienen en diferentes procesos de la fisiología celular, relacionados con el crecimiento y la diferenciación. Tales productos pertenecen a los tipos siguientes: factores de crecimiento, receptores de factores de crecimiento, transductores de señales, proteínquinasas y proteínas nucleares.



5. TRANSFORMACION DE CELULAS EN CULTIVO por agentes cancerígenos. El tratamiento de células en cultivo, fibroblastos de ratón por ejemplo, con dosis altas de agentes cancerígenos, físicos (*izquierda*) o químicos (*derecha*), provoca la muerte de la mayoría de las células al acumularse las mutaciones en su ADN. Sin embargo, las células que sobreviven repueblan el cultivo y alguna de ellas sufre una transformación, en virtud de la cual adquieren un fenotipo similar al de muchas células tumorales: crecimiento incontrolado, pérdida de la inhibición por contacto en los cultivos *in vitro*, morfología de células indiferenciadas y, por último, capacidad de formación de tumores en animales de laboratorio. Las dos primeras características determinan que las colonias constituidas por células transformadas aparezcan como focos distinguibles.

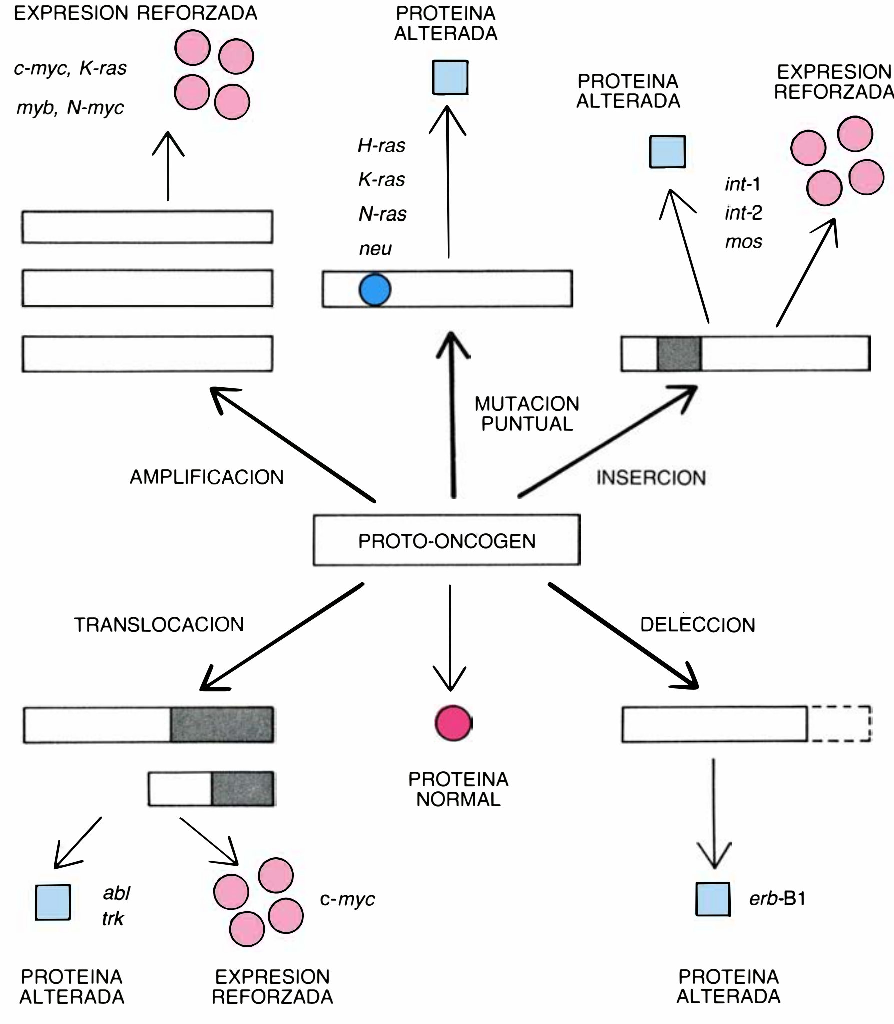
De los factores de crecimiento que proceden de los proto-oncogenes, citaremos el *sis*, que es parte del factor de crecimiento derivado de plaquetas (PDGF), y el *int-2*, homólogo del factor de crecimiento de fibroblastos. Los receptores derivados de los proto-oncogenes son el *erb B1*, receptor del factor de crecimiento epitelial, y el *fms*, receptor de un factor de crecimiento de células mieloides (CSF-1).

Un tercer tipo de moléculas producido por los proto-oncogenes es el de los transductores de señales, como las proteínas *ras*, unidas a la cara interna de la membrana celular y que son capaces de hidrolizar GTP. Su función en las células animales, todavía incierta, debe resultar importante porque los genes *ras* persisten en toda la escala animal. Se cree que la hidrólisis del GTP sirve para transmitir señales de proliferación y diferenciación a substratos no identificados aún en respuesta a estímulos externos, lo que es coherente con su alojamiento en la membrana celular.

También se cuentan entre los productos de los proto-oncogenes las proteínquinasas de serina o tirosina, que son proteínas reguladoras por acción fosforilante sobre otras proteínas; es el caso de los oncogenes *src* y *abl*. Y, por último, las proteínas nucleares, que desempeñan, así se cree, funciones reguladoras de la expresión génica en el dominio del ADN, como *myc*, *myb* y *fos*.

¿Cuáles son los ensayos que permiten detectar un oncogén activado en un tumor? En un comienzo se aprovechaba la capacidad de los oncogenes de producir un fenotipo transformado cuando se introducían en células indicadoras. Se trataba del ensayo de formación de focos. Consistía en añadir el ADN del tumor en forma de precipitado con fosfato cálcico sobre una monocapa de células pertenecientes a una línea de fibroblastos de ratón, llamada NIH 3T3. Estas células presentan una morfología plana y fusiforme; su crecimiento se inhibe al entrar en contacto unas células con sus vecinas (fenómeno de inhibición por contacto). Cuando alguna de estas células toma ADN que posee un oncogén activado, su fenotipo se transforma y comienza a dividirse activamente y a las dos o tres semanas forma un "foco" sobre la monocapa de fibroblastos normales con las características descritas antes. El hecho de que el tratamiento de fibroblastos con agentes cancerígenos produjera el mismo efecto fenotípico que la transfección de un oncogén activado sugería que esta activación oncogénica constituía el fundamento de la acción tumorigénica de dichos agentes, algo que se ha demostrado ya *in vivo*.

Otro ensayo de detección de oncogenes era una variación del anterior, y supuso un aumento de la sensibilidad. Consiste en transferir ADN del tumor a ensayar a fibroblastos de ratón; las células que recibían dicho ADN se inyectaban luego en ratones "desnudos", raza ésta que carece de timo y de consiguiente inmunidad celular; esos ratones desnudos no podían, pues, rechazar las células que se les inyectaban, aunque no fueran propias. El oncogén se detectaría por el crecimiento de un tumor en el sitio de la inyección. Este método y el anterior, basados ambos en la transferencia (o transfección), sirven para detectar sólo unos cuantos tipos de oncogenes, sobre todo los de la familia *ras*.



6. MECANISMO DE ACTIVACION DE ONCOGENES. La conversión de un proto-oncogén normal en un oncogén (activación) puede tener lugar por mutaciones en la secuencia codificadora del gen, inserciones de secuencias extrañas en el interior del gen, deleciones de secuencias del gen, translocaciones hacia otro cromosoma de parte del gen o de éste entero y, por último, multiplicación de las secuencias del gen (amplificación). Alteraciones genéticas que producen la síntesis, por parte del oncogén activado, de una proteína aberrante que, si bien tiene actividad biológica, no está sometida a la regulación propia de la proteína producto del proto-oncogén. Puede ocurrir también que las alteraciones afecten a las regiones reguladoras de la transcripción génica y, aunque se sintetice una proteína normal, se produce en cantidades anormales.

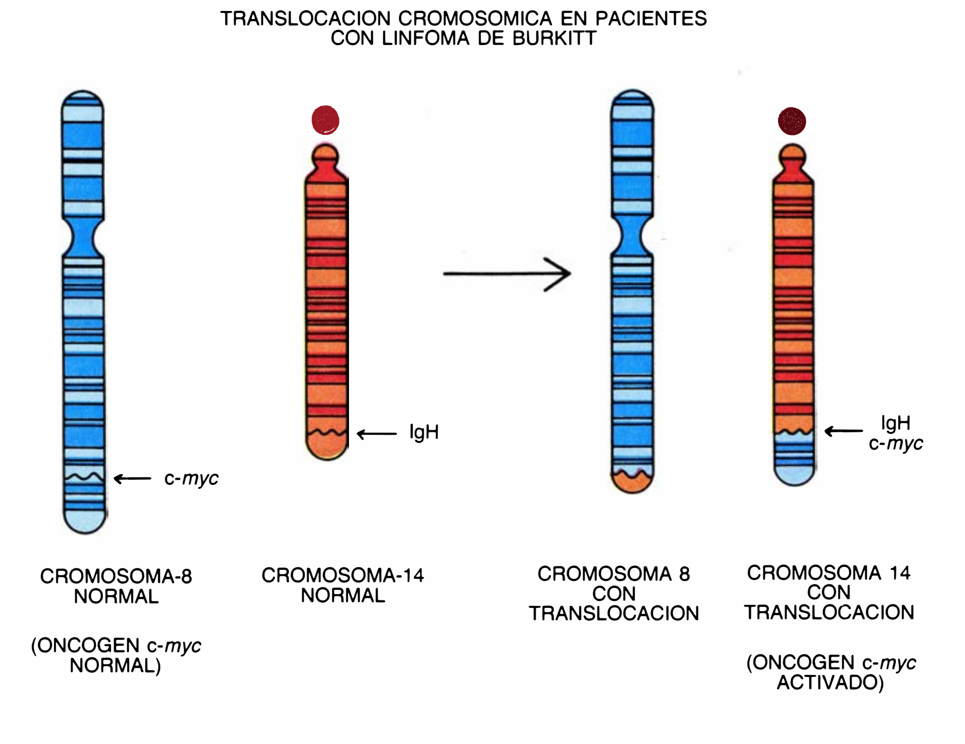
En los últimos años han aumentado sustancialmente la sensibilidad y la resolución de la técnica por la que se determinan los cariotipos. Ello ha facilitado la detección de translocaciones cromosómicas. Combinando estas técnicas y la hibridación *in situ* de cromosomas con sondas radiactivas de ADN, se ha demostrado que los oncogenes c-*myc* y *abl* se hallan en las inmediaciones de los puntos de translocación de los correspondientes cromosomas

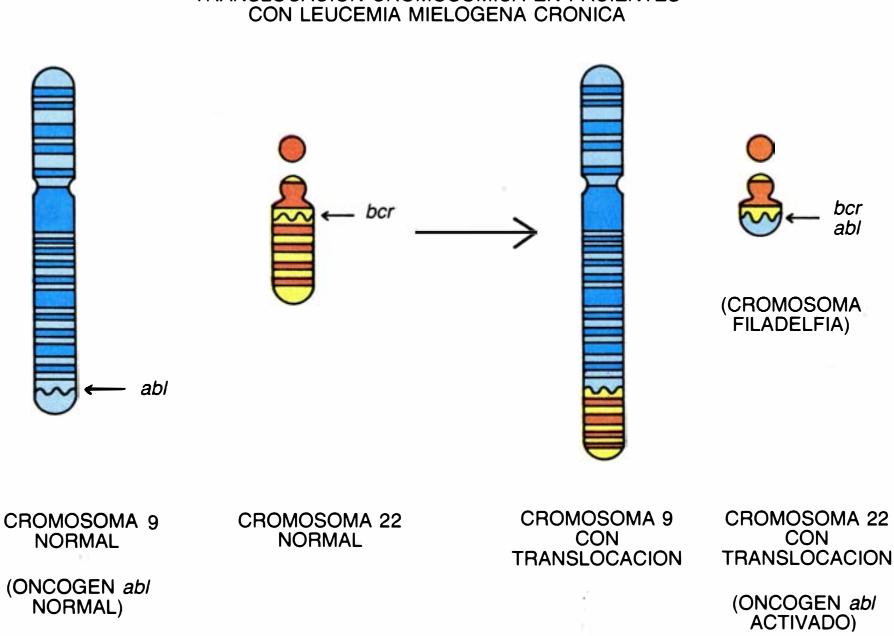
La técnica que se ha demostrado más versátil para analizar la mayor parte de las alteraciones genéticas conducentes a la activación de oncogenes es la llamada técnica de Southern. Su uso es

posible cuando se posee una sonda específica, es decir, un fragmento clonado del ADN del oncogén que suele ir marcado con fósforo radiactivo. El ADN a analizar se digiere con alguna enzima de restricción, los fragmentos resultantes se separan mediante electroforesis en gel de agarosa y se transfieren a un filtro de nitrocelulosa. El filtro se hibrida con la sonda radiactiva y, por autorradiografía, se detecta la presencia y la cantidad de ADN homólogo al de la sonda empleada. Comparando las imágenes obtenidas con una sonda de oncogén en el ADN de células normales y células tumorales, se detectarán translocaciones, inserciones, deleciones y multiplicaciones génicas.

El método directo para detectar las mutaciones puntuales es, por supuesto, la clonación y secuenciación del gen activado, para compararlo luego con el normal. Se trata de un proceso muy laborioso. Sin embargo, dos nuevas técnicas han venido a facilitar, en los últimos años, la detección de mutaciones puntuales. Una de ellas, empleada por primera vez para la detección de mutaciones en los genes *ras* por los autores en el Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York, consiste en hibridar el ADN a ensayar con un oligonucleótido que sea perfectamente complementario de la secuencia de interés. Con temperaturas de hibridación y lavado adecuadas se consigue discriminar entre dos secuencias que se distinguen en sólo una base.

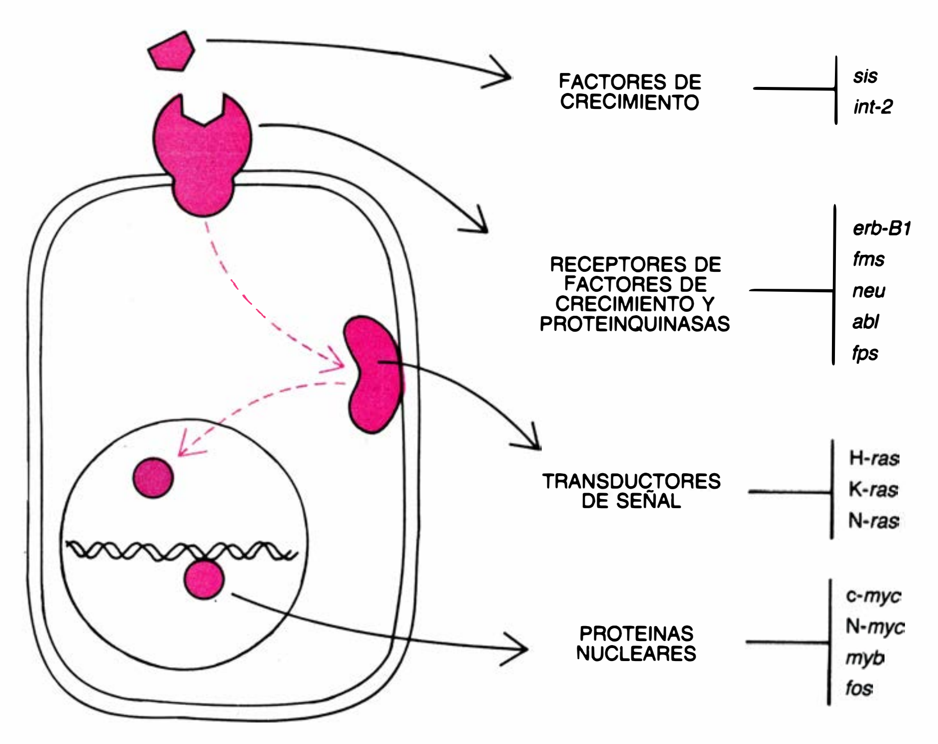
La segunda técnica, desarrollada por Manuel Perucho y colaboradores en la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, consiste en clonar la región del oncogén a analizar en un vector que permite la producción de ARN antisentido (es decir, complementario del ARN celular); luego, se hibrida el ARN antisentido con el ARN extraído de las células tumorales. Esos híbridos ARN-ARN se digieren a continuación por ribonucleasas que digieren el ARN sólo cuando se encuentra en forma de cadena sencilla, y así pueden cortar híbridos de dos cadenas si existe desapareamiento de una sola base. Si se separan los productos de la digestión por electroforesis en geles de poliacrilamida, se determinará el lugar de la mutación puntual en razón del tamaño de los fragmentos obtenidos.





7. ACTIVACION DE ONCOGENES POR TRANSLOCACION. Los pacientes de linfoma de Burkitt presentan una aberración que consiste en la translocación recíproca entre los extremos de los brazos grandes de los cromosomas número 8 y número 14 (*arriba*). Esta translocación afecta al proto-oncogén c-*myc*, que pasa a situarse en la vecindad de los genes de las cadenas pesadas de las inmunoglobulinas (IgH) del cromosoma 14. Esto provoca la pérdida de control normal de la expresión del proto-oncogén, que resulta así activado. Una situación similar ocurre en los pacientes de leucemia mieloide crónica, con los cromosomas 9 y 22, cuyas translocaciones dan lugar a la aparición de un pequeño cromosoma típico: el cromosoma Filadelfia. La translocación afecta al proto-oncogén *abl*, que resulta truncado en el cromosoma 9 y se forma un gen híbrido con el gen *bcr* del cromosoma 22, produciéndose una proteína que tiene actividad oncogénica.

Hemos visto hasta aquí la existencia de agentes físico-químicos capaces de producir cáncer y se ha demostrado la presencia de oncogenes activados en los tumores; hemos visto también que esos oncogenes, inoculados en células en cultivo, producen la transformación de éstas en fenotipos cancerosos, lo que parece demostrar que la activación de esos genes constituye el origen del proceso tumorigénico. Ahora bien, ¿cómo ocurre la activación de un proto-oncogén *in vivo*? ¿Basta la activación de un determinado oncogén para inducir un tumor? ¿Cuál es el mecanismo por el que un oncogén activado desencadena o colabora en la carcinogénesis? Nos hallamos muy lejos



8. LUGAR DE ACCION DE LOS ONCOGENES en la célula. Algunos proto-oncogenes aparecen indicados con la correspondiente localización celular de sus productos. Entre estos últimos citaremos factores de crecimiento (*sis*, *int-2*), receptores de membrana de factores de crecimiento y quinasas proteínicas ligadas a membrana (*erb-B1*, *fms*, *neu*, *abl*, *fps*), proteínas transductoras de señal y ancladas en la cara interna de la membrana celular (los tres oncogenes *ras*) y proteínas nucleares que se cree que activan la expresión de genes específicos (*fos*, *myb*, c-*myc*, N-*myc*). Sin embargo, falta aún por aclarar cuáles son los segundos mensajeros de los receptores de factores de crecimiento, cuáles son los sustratos fisiológicos de las proteínas *ras* y qué genes resultan selectivamente activados por los proto-oncogenes que intervienen en el núcleo celular.

de poder dar respuesta a esos interrogantes; en lo que al cáncer humano se refiere, no se ha encontrado el mismo oncogén de una manera persistente en un tipo determinado de tumor, a excepción de algún tipo de leucemia.

Sin embargo, en los últimos años se han empezado a utilizar modelos fundados en sistemas animales para abordar el estudio de la carcinogénesis desde el punto de vista molecular. Estos modelos están capacitados para inducir tumores con un rendimiento bastante elevado y sus parámetros (el tipo de carcinógeno, la dosificación, el régimen de tratamiento, el tejido interesado, etcétera) pueden ser manipulados. ¿Qué alteraciones oncogénicas se han detectado en esos modelos.

Empecemos por los tumores cutáneos. La piel representa un modelo de carcinogénesis atractivo por dos razones. En primer lugar, es un órgano fácilmente accesible que permite la aplicación localizada del agente carcinogénico; las lesiones pueden controlarse, además, de manera sencilla. Algunos diseños experimentales permiten analizar por separado los procesos de iniciación y promoción del tumor; con otros podemos seguir la progresión de un tumor benigno a otro maligno. De acuerdo con uno de los protocolos habituales, se aplica sobre la piel de ratones una pequeña dosis inicial de 7,12-dimetilbenz(a)antraceno (DMBA) como iniciador, seguida de aplicaciones repetidas de 12-0-tetradecanoilforbol-13-acetato (TPA) como promotor. Se inducen así papilomas (tumores benignos de la piel), de los cuales un 10 o 20 por ciento se transforma en carcinomas malignos. Sin embargo, ni la dosis inicial de DMBA ni las sucesivas de TPA son capaces de inducir tumores por sí solas. Alan Balmain y colaboradores, del Instituto Beatson de Glasgow, demostraron la presencia del oncogén H-*ras* en papilomas y carcinomas de ratón inducidos de esta manera.

Otro protocolo muy usado consiste en aplicaciones repetidas sucesivas de DMBA u otros hidrocarburos policíclicos. Con este régimen se obtienen directamente carcinomas epidermoides, lo que posibilita el estudio de una ruta carcinogénica distinta. Anne Skalka y sus colaboradores, del Instituto Hoffman-La Roche de New Jersey, demostraron también la activación del gen H-*ras* en estos carcinomas.

Un tercer protocolo de carcinogénesis epitelial es similar al anterior en lo concerniente al carcinógeno (DMBA) y al régimen de aplicación, si bien aquí se aplica en la superficie interna de la oreja del conejo. Se produce un resultado distinto. Se obtiene un tipo de tumores benignos, o queratoacantomas, que remiten espontáneamente. Conviene señalar que esos tumores se dan también en humanos y con las mismas características. Los autores han encontrado el oncogén H-*ras* activado en esos tumores inducidos en conejo y también en su homólogo humano.

La piel ha servido también de órgano efector (o diana) para la acción carcinogénica de la radiación. De los protocolos empleados, uno consiste en la exposición de ratas a un haz de electrones de 0,8 megaelectronvolt de energía, cuya penetración máxima en la piel es de un milímetro; tras ello, aparecen tumores de diverso tipo a los 12 o 18 meses. Seymour Garte y sus colaboradores, del Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York, han encontrado activación de los oncogenes c-*myc* y K-*ras* en tumores inducidos de esa manera.

Los adenocarcinomas mamarios se inducen con un elevado rendimiento tras la inoculación, en ratas jóvenes, de una dosis intravenosa del agente alquilante N-metilnitrosourea (NMU). Se producen tumores en el 90 por ciento de los animales sujetos a la prueba, a los seis o 12 meses. De este modelo sobresalen dos características interesantes: la administración sistémica de un carcinógeno provoca tumores en un órgano específico y los estímulos hormonales actúan, según parece, de promotores; prueba esto último la ovariectomía de las ratas antes del tratamiento con NMU, que rebaja la incidencia de los tumores hasta niveles irrelevantes. En este sistema modelo, Mariano Barbacid y sus colaboradores, del Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos, demostraron que la mayoría de los tumores contenían el oncogén H-*ras* activado.

Un tercer grupo de tumores inducidos por cancerígenos químicos o radiactivos es el de los linfomas de timo. En este modelo se inyectan ratones jóvenes intraperitonealmente con NMU o bien se exponen a radiación gamma. En ambos casos, un 90 por ciento de los animales de experimentación desarrollan, tres o seis meses más tarde, linfomas de timo, indistinguibles entre sí por criterios histológicos. Igual que acontecía con los adenocarcinomas mamarios, el tratamiento sistémico produce tumores en un órgano específico. Sin embargo, incluso en este caso, dos

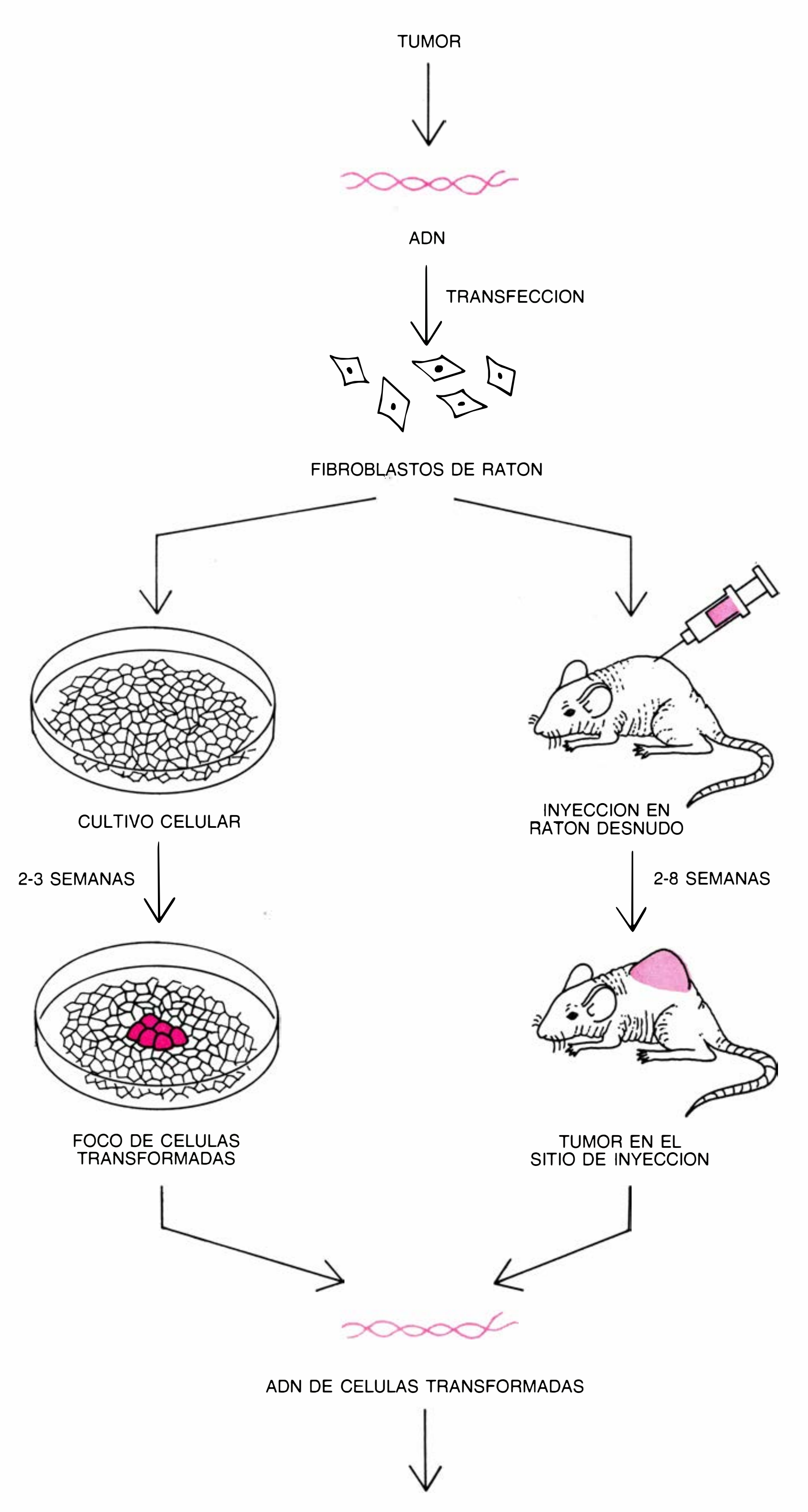
agentes distintos (un compuesto químico alquilante y una radiación ionizante) producen un tipo de tumor idéntico en el mismo órgano. Los autores han demostrado la activación de los proto-oncogenes K-*ras* y N-*ras* en linfomas inducidos con NMU y con radiación gamma.

Un cuarto grupo está formado por tumores del sistema nervioso. Para provocar ese tipo de cánceres se inyecta, en fetos de rata, por vía transplacentaria otro agente alquilante: N-etinilnitrosourea (ENU). Con este tratamiento, el 95 por ciento de las ratas desarrollan tumores del sistema nervioso (neuroblastomas, gliomas, schwanomas) con una latencia de cuatro a 10 meses. Robert Weinberg y sus colaboradores, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, demostraron que esos tumores contenían el oncogén *neu*, activado mediante mutaciones puntuales.

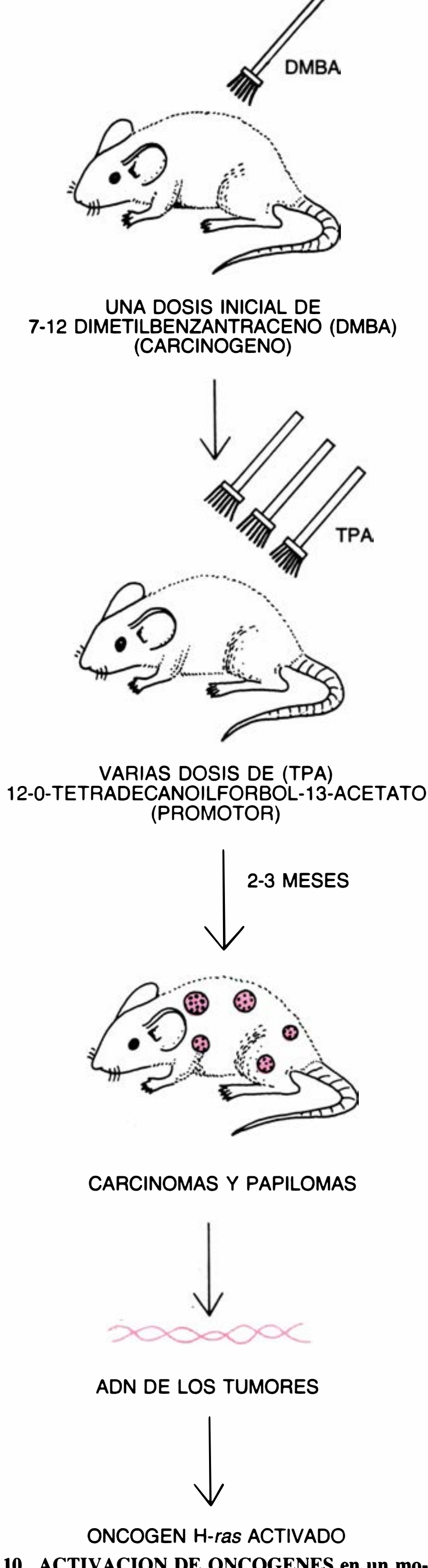
¿Qué decir de los tumores hepáticos? Existen algunas cepas de rata y ratón que desarrollan espontáneamente tumores de hígado con alta frecuencia (10 o 12 por ciento en los animales), tanto benignos (adenomas) como malignos (carcinomas). Se pueden inducir también tumores hepáticos con mayor incidencia tras inyectar carcinogénos a esos animales de laboratorio por vía intraperitoneal. Marshall Anderson y colaboradores, del Instituto Nacional de Ciencias del Medio Ambiente en Carolina del Norte, encontraron el oncogén H-*ras* activado en carcinomas y adenomas espontáneos, así como en tumores inducidos con carcinógenos químicos.

Queda, por fin, el grupo de los plasmacitomas. Se trata de un tipo de linfomas, inducidos en ratones mediante inyección intraperitoneal de una serie de hidrocarburos, sobre todo el pristano (2,6,10,14-tetrametilpentadecano). La incidencia de plasmacitomas es del 60 por ciento. Grace Shen-Ong y Michael Cole, del Hospital Clínico de la Universidad de San Luis, demostraron que en las células tumorales se había producido una translocación cromosómica que resultaba en la activación del proto-oncogén c-*myc*. Este gen translocado se sitúa junto a los genes responsables de inmunoglobulinas que inducen la sobreexpresión del c-*myc*.

En la mayoría de estos modelos se obtiene activación de los proto-oncogenes *ras*, pero importa señalar que los tumores de origen epitelial (cutáneos, mamarios y hepáticos) contienen H-*ras* activado, mientras que los de origen mesodérmico (linfomas tímicos) mues-



9. METODOS DE DETECCION DE ONCOGENES, fundados en la trasferencia de ADN. El ADN extraído del tumor a analizar se transfiere a fibroblastos de ratón de líneas celulares llamadas 3T3. La transferencia se suele llevar a cabo añadiendo, al cultivo celular, ADN precipitado con fosfato cálcico. Una vez introducido ese ADN en las células, se espera un par de semanas, más o menos, hasta que aparece algún "foco" de células transformadas por el oncogén sobre la monocapa de fibroblastos normales (*esquema de la izquierda*) o bien se inyectan las células receptoras de la transferencia en un ratón "desnudo" (carente de timo e inmunidad celular y no rechaza, por tanto, las células extrañas) (*esquema de la derecha*). De las células transformadas del foco o del tumor del ratón se vuelve a extraer el ADN y se compara éste con ADN de células normales para proceder a la identificación o, llegado el caso, abordar el clonaje del oncogén transformante.



10. ACTIVACION DE ONCOGENES en un modelo de carcinogénesis cutánea. Se pueden inducir tumores en la piel del ratón aplicando una dosis única, iniciadora, de 7,12-dimetilbenz(a)antraceno (DMBA), un agente mutágeno, y, a continuación, cada semana, otra dosis de 12-O-tetradecanoilforbol-13-acetato (TPA), un agente promotor de tumores. Al cabo de 3-6 meses, según la raza de ratones, aparecen papilomas en la piel, muchos de los cuales se convierten en carcinomas malignos. El grupo de Alan Balmain, del Instituto Beatson de Glasgow, ha demostrado que, en la mayoría de los tumores (papilomas y carcinomas) inducidos así, se encontraba el oncogén H-*ras* activado y que la mutación activante era la misma en todos los casos: un cambio de adenina por timina en el codón 61 del gen.

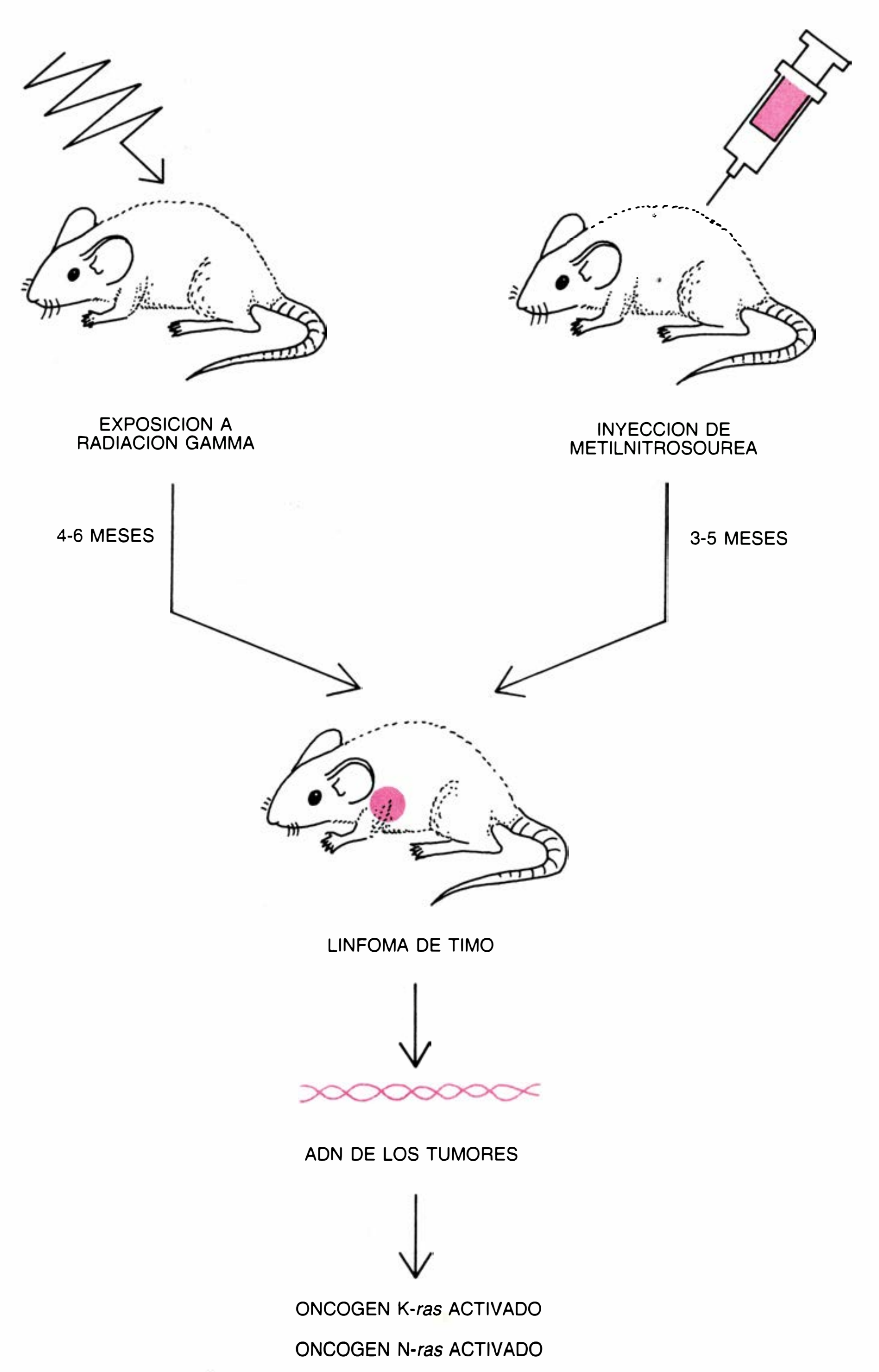
tran activación del K-*ras* o N-*ras*. Los proto-oncogenes *ras* se expresan de manera distinta en los diferentes tejidos, expresión que podría determinar la especificidad en la activación de uno u otro gen, según el tejido efector del carcinógeno.

Conviene asimismo resaltar que, en los casos en que se han obtenido y analizado tumores benignos, se ha encontrado activación del oncogén H-*ras*, tanto en los tumores que persisten (papilomas, adenomas hepáticos) como en los que remiten (queratoacantomas). Significa ello, quizá, que la activación oncogénica constituye, en dichos sistemas, un episodio precoz del proceso tumoral.

Un experimento realizado por Alan Balmain, Kenneth Brown, Miguel Quintanilla y colaboradores, del Instituto Beatson de Glasgow, corrobora la idea según la cual los carcinógenos intervienen en la iniciación del proceso tumoral activando oncogenes, en este caso el H-*ras*. El ensayo consistió en sustituir el carcinógeno iniciador DMBA por un virus que portaba el oncogén H-*ras* activado en el protocolo de carcinogénesis en piel de ratón descrito antes. Se observó que, por sí sola, la infección de las células de la epidermis por el virus no producía efecto alguno; ahora bien, cuando a ella le seguían aplicaciones del agente promotor TPA, se desarrollaban carcinomas y papilomas, igual que cuando se empleaba el carcinógeno químico DMBA para iniciar el proceso tumoral.

Interesa también investigar si las mutaciones puntuales que se obtienen en distintos tumores, dentro del mismo sistema tomado por modelo, son idénticas y si existe alguna correlación entre el agente carcinogénico y el tipo de mutación detectada. Hay que destacar, a este propósito, que, con la mayoría de los carcinógenos químicos empleados, las mutaciones son las mismas dentro de cada sistema. Pero un mismo agente carcinogénico puede producir tumores con diferentes mutaciones según el sistema modelo utilizado.

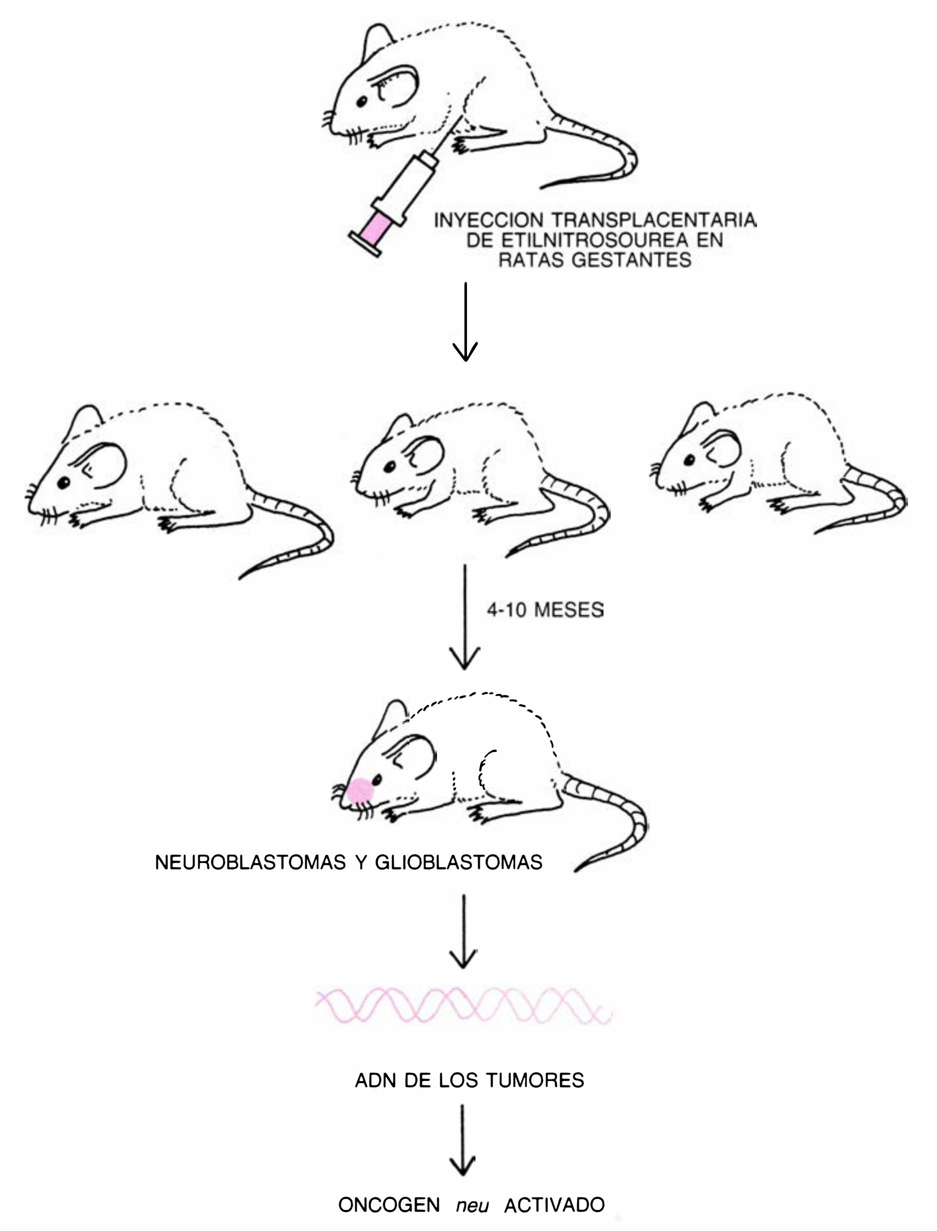
Para explicar esa variación en las mutaciones producidas, se han avanzado dos hipótesis. De acuerdo con la primera, la mutación descubierta en el tumor podría constituir el resultado de un acontecimiento que ocurriera durante la progresión del tumor y no viniera necesaria y directamente causado por el carcinógeno. De acuerdo con la segunda hipótesis, la mutación presente en el tumor podría obedecer a una selección biológica del sistema; en éste,



11. ACTIVACION DE ONCOGENES en linfomas de ratón. La irradiación de ratones con rayos gamma (*arriba a la izquierda*) a razón de 150 rad semanales durante cuatro semanas o la inyección intraperitoneal de N-metilnitrosourea (NMU) (*arriba, a la derecha*) en dosis de 0,6 miligramos semanales durante cinco semanas induce linfomas de timo. Los tiempos de latencia varían con el tipo de agente cancerígeno empleado y con la raza de ratones sujeta a experimentación. Los autores, trabajando en el Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York, encontraron los oncogenes K-*ras* y N-*ras* activados en el ADN de linfomas inducidos por ambos agentes. Tras aislar estos genes, y mediante su secuenciación y su hibridación posterior con oligonucleótidos específicos, se demostró que las mutaciones activantes afectaban a los aminoácidos en las posiciones 12 y 61 de las proteínas determinadas por los genes K-*ras* y N-*ras* de los distintos tumores.

sólo una mutación sería carcinogénica, y se seleccionarían las células que la presentaran, aun cuando dicha mutación ocurriera con una frecuencia baja, porque las demás no darían origen a tumores.

De la misma forma que algunos investigadores se mostraron en un comienzo escépticos ante la posibilidad de que un carcinógeno químico produjera la misma mutación en el mismo oncogén de los sistemas modelo, ha habido una resistencia, todavía mayor, a admitir que los rayos gamma activen



12. ACTIVACION DE ONCOGENES EN TUMORES DEL SISTEMA NERVIOSO. La inyección trasplacentaria de ratas gestantes o de ratas recién nacidas con N-etilnitrosourea (ENU), en dosis únicas de un miligramo, induce la formación de tumores del sistema nervioso central y periférico, como neuroblastomas y glioblastomas. El grupo de Robert Weinberg, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, encontró en el ADN de estos tumores un oncogén no descrito hasta entonces, el *neu*. Al igual que los oncogenes *ras*, el oncogén *neu* se muestra capaz de transformar fibroblastos de ratón 3T3. Responsable de la activación del oncogén *neu* en estos tumores es una mutación puntual de adenina en timina en el codón 664 de su secuencia codificadora; mutación que provoca un cambio de aminoácido en la proteína correspondiente. El protooncogén *neu* determina una proteína similar al receptor del factor de crecimiento epidérmico.

oncogenes mediante mutaciones puntuales, pues es sabido que su principal efecto es la ruptura de una o ambas cadenas del ADN, lo que resultaría en deleciones y translocaciones. No obstante, en los últimos años se han ido acumulando pruebas que consolidan la hipótesis según la cual la radiación gamma produce también mutaciones puntuales. Estos datos dejan abierta la posibilidad de que las mutaciones puntuales detectadas en los genes K-*ras* y N-*ras* en linfomas de timo inducidos por rayos gamma sean resultado directo de la acción de la radiación o indirecto a través de la acción de los sistemas celulares de reparación del ADN.

El estudio molecular de esos sistemas constituidos en modelos nos ha permitido, pues, ahondar en los procesos moleculares de la carcinogénesis. Conviene tener presente, sin embargo, que el cáncer es un proceso multifásico; por consiguiente, aunque la activación de algún oncogén sea el primer acontecimiento que desencadene el proceso carcinogenético, no basta ella sola para provocar la aparición de un tumor maligno. Viene eso demostrado por la presencia de oncogenes activados en tumores que pueden remitir y por el largo período de latencia que transcurre antes de la formación del cáncer. Intervienen, pues, otros elementos en el desarrollo del tumor: hormonas, factores de crecimiento y agentes promotores.

A modo de recapitulación, podríamos entresacar los puntos principales analizados a lo largo del artículo y que vendrían a ser, también, las conclusiones finales. En primer lugar, hay agentes químicos, naturales o artificiales, y físicos (radiaciones) que pueden reaccionar con el ADN y producir mutaciones; segundo, la mayoría de los agentes mutagénicos inducen tumores en animales que portan genes alterados con potencial oncogénico; tercero, estos genes pertenecen a un repertorio limitado del genoma y ejercen una función en los procesos de proliferación y diferenciación celulares (oncogenes); cuarto, las alteraciones detectadas que determinan la actividad oncogénica son: mutaciones puntuales, inserciones, deleciones, multiplicaciones (amplificaciones) y translocaciones; quinto, en algunos sistemas existe una estrecha correlación entre las alteraciones detectadas en los oncogenes y las propiedades físicas y químicas del carcinógeno, mientras que en otros la explicación de las alteraciones reside en la selección biológica.

Como lógica consecuencia de estos estudios, se debe proseguir en la vigilancia de los agentes físicos y químicos que nos rodean y ahondar, al propio tiempo, en la investigación de los mecanismos fundamentales de la proliferación celular, alterados por la activación oncogénica, para poder de ese modo diseñar terapias eficaces contra el cáncer.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE MOLECULAR GENETICS OF CELLULAR ONCOGENES. H. E. Varmus en *Ann. Rev. Genet.*, vol. 18, págs. 553-612. 1984

CELLULAR ONCOGENES AND THE PATHOGENESIS OF HUMAN CANCER. R. Dalla-Favera y E. Cesarman en *Human Genes and Diseases*, dirigido por F. Blasi. John Wiley & Sons. Nueva York. 1986.

MUTAGENS, ONCOGENS AND CANCER. M. Barbacid en *Trends in Genetics*, vol. 2, págs. 188-192, 1986.

MUTATIONAL ACTIVATION OF ONCOGENES IN ANIMAL MODEL SYSTEMS OF CARCINOGENESIS. I. Guerrero y A. Pellicer en *Mutation Res*. vol. 185, págs. 293-308. 1987.

THE MOLECULAR GENETICS OF CANCER. J. M. Bishop en *Science*, vol. 235, págs. 305-311. 1987.

Los aceleradores, banco de pruebas de la teoría cosmológica

¿Existe límite para el número de familias de partículas elementales? Los restos de la gran explosión que originó el universo sugieren que sí lo hay. Y los nuevos aceleradores están alcanzando las energías necesarias para confirmarlo

David N. Schramm y Gary Steigman

A lo largo de los últimos diez años, dos dominios de la ciencia, la cosmología y la física de las partículas elementales, han desarrollado una relación simbiótica de la que se han derivado resultados muy valiosos. Abren éstos un nuevo panorama de la creación del espacio-tiempo y la materia y nos transportan a épocas muy tempranas: las que transcurrieron entre los 10^{-43} y los 10^{-35} segundos después del nacimiento del universo, en la explosión primordial o "big bang". La propia naturaleza de la gran explosión pueden sernos mejor conocida gracias a la profundización de una nueva teoría, la del todo o TDT (denominada también TOE, del inglés "theory of everything"). Una TDT describiría audazmente y de un golpe las interacciones entre las partículas fundamentales.

La confluencia de la cosmología y la física de partículas está incluso cambiando la manera de crear ciencia. Tradicionalmente, la astronomía ha sido una ciencia más observacional que experimental: dominaba la observación, pasiva, a través del telescopio; no había experimentación, activa y sometida a control. Tradicionalmente también, los instrumentos de la física de partículas eran los aceleradores de altas energías. Pero la cosmología ha empezado ya a formular predicciones acerca de la física de las partículas elementales y entra dentro de lo verosímil que tales predicciones cosmológicas puedan comprobarse en los experimentos, cuidadosamente controlados, que se desarrollan en los aceleradores. Se ha tardado más de 10 años en poner a punto los aceleradores de suerte que pudieran llevarse a cabo los experimentos apropiados. Los ensayos están en marcha. Es más, los resultados provisionales confirman las predicciones de la cosmología.

Parece, pues, que la cosmología se ha convertido en una ciencia genuina, donde no sólo se formulan ideas sino que, además, se someten a comprobación en el laboratorio en escalas temporales más cortas que la vida media de un científico. Se superan así viejos modos, de proliferación de teorías cosmológicas y nula confirmación o refutación de cualquiera de ellas por otros medios que no fueran su atractivo estético. A su vez, los telescopios sirven, por fin, para comprobar las hipótesis de la física fundamental, tales como la propuesta de una TDT. Cierto es que las comprobaciones de las teorías donde se tienen en cuenta las interacciones de partículas con energías ingentes sólo disponen de un laboratorio fidedigno y adecuado: la propia gran explosión.

Entre los resultados más excitantes que ha producido la relación de la cosmología y la física de partículas se cuenta el primer fruto de ese maridaje: el universo no sería el mismo si hubiera numerosas clases fundamentales de partículas elementales. En otras palabras, se deduce de la cosmología una cifra corta de partículas fundamentales. Esta predicción es la conclusión de nuestro análisis sobre las reacciones nucleares que tuvieron lugar cuando el universo cumplía aproximadamente su primer segundo. Nos hemos atrevido a convertir las magnitudes cosmológicas (pensemos, a modo de ejemplo, en la densidad media de energía) en magnitudes de interés en física de partículas (así, el número de partículas fundamentales).

Nuestra predicción, que no ha perdido interés, llamó poderosamente la atención en el momento en que se propuso porque prevalecía entonces la opinión según la cual, conforme los aceleradores alcanzaran energías más altas, irían descubriéndose nuevas partículas. Las teorías de la física de partículas no habían impuesto límites restrictivos al número de clases de partículas fundamentales que podían existir. No parecía entreverse ningún final. Ahora nos encontramos ante una predicción teórica realizada a partir de consideraciones cosmológicas que contradice dicha deducción empírica. Con el tiempo, la predicción no sólo ha mantenido su validez, sino que ha ido ganando en firmeza. La cifra de partículas fundamentales tiene coto; si así no fuera, el universo sería distinto del que conocemos.

Antes de explicar las razones cosmológicas que imponen un tope al número de clases de partículas elementales, conviene dar un breve repaso a la física de partículas. Los experimentos en los aceleradores de partículas, desarrollados a lo largo de los últimos cincuenta años, establecieron dos clases principales de partículas fundamentales, fermiones y bosones (que reciben el nombre del físico italo-americano Enrico Fermi y del físico hindú S. N. Bose). Los fermiones son las partículas que constituyen la materia y los bosones son los transmisores de las fuerzas que se dan entre las partículas. A su vez los fermiones se dividen en dos subclases: quarks y leptones. Los quarks son los constituyentes de los neutrones,

DAVID N. SCHRAMM y GARY STEIGMAN han sido pioneros en el desarrollo de la interfase entre la cosmología y la física de partículas. Schramm, que ocupa la cátedra Louis Block de ciencias físicas en la Universidad de Chicago, se doctoró en 1971 por el Instituto de Tecnología de California. Steigman es profesor de física y astronomía en la Universidad estatal de Ohio, aunque se formó en la municipal de Nueva York.

protones y otras partículas emparentadas llamadas hadrones. Los leptones, si tienen carga eléctrica, como en el caso del electrón, pueden girar en torno al núcleo para formar átomos; si carecen de carga, como los neutrinos, pueden atravesar toda la tierra sin interaccionar con nada. Cada partícula presenta también una antipartícula con igual masa y vida media, pero con propiedades eléctricas opuestas.

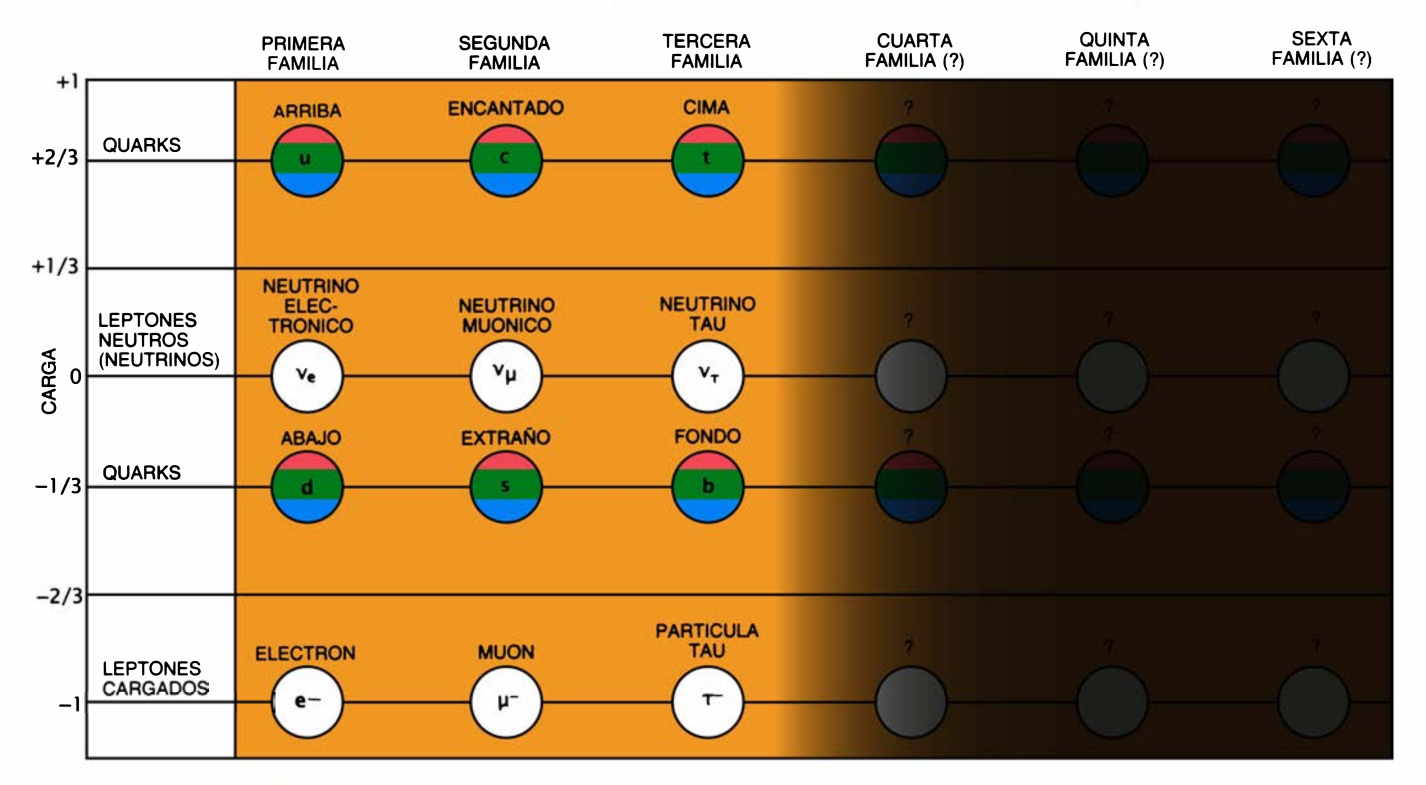
Las interacciones entre las distintas partículas se rigen por cuatro fuerzas fundamentales, cada una de las cuales es transmitida por un bosón o conjunto de bosones específico. El fotón, o cuanto de luz, transmite la fuerza electromagnética que acopla las cargas eléctricas; el gravitón transmite la fuerza gravitacional, que acopla las masas; ocho gluones transmiten la fuerza nuclear fuerte, que acopla los quarks, y los bosones vectoriales intermediarios transmiten la fuerza nuclear débil, que es responsable de ciertas desintegraciones nucleares. Por el momento, todas las interacciones del universo pueden reducirse a combinaciones de estas cuatro interacciones.

Uno de los avances más excitantes de la física del siglo XX ha sido la demostración de que, a altas energías o temperaturas, las cuatro fuerzas tienden a unificarse. En particular, los experimentos del CERN, el laboratorio europeo de física de partículas, han demostrado que la fuerza débil y la electromagnética se funden en una única fuerza electrodédil a energías por encima de los 100.000 millones de electronvolt (100 GeV). Una energía de ese calibre corresponde a la temperatura que registró el universo a los 10^{-10} segundos después de la gran explosión, que era más de cuatro billones de veces la temperatura ambiente. Los hallazgos del CERN han avivado la esperanza de que la fuerza fuerte se fundirá con la fuerza electrodébil a aproximadamente 10^{15} GeV en alguna teoría de gran unificación (TGU, o GUT, como se la conoce también) y que a unos 10^{19} GeV la fuerza de la gravedad se le unirá para dar una TDT.

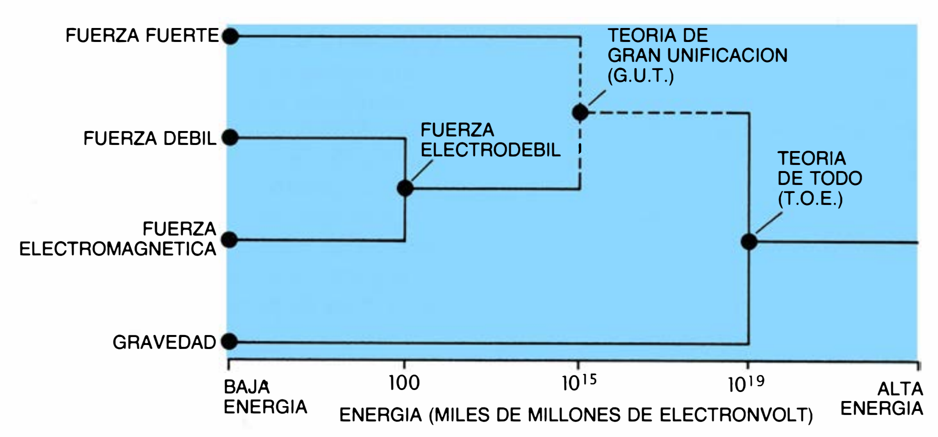
Las energías necesarias para poner a prueba experimentalmente las propuestas de TGU y TDT son altísimas en comparación con las energías que pueden proporcionar los aceleradores de partículas existentes. El mayor acelerador del mundo, el Tevatrón del Laboratorio Nacional Fermi, mide cuatro kilómetros de circunferencia y a duras penas alcanza energías de dos billones de electronvolt, 2000 GeV. Un acelerador análogo al Tevatrón, cuya energía fuera suficiente para permitirnos comprobar una hipótesis de TGU, llegaría hasta las estrellas más próximas, y una máquina para comprobar las TDT se extendería hasta el centro de la galaxia. Ambas máquinas están fuera del alcance de los más optimistas presupuestos científicos. Tras esta sencilla reflexión nos hemos decidido por la utilización de las observaciones cosmológicas para comprobar las predicciones de la física de partículas.

El flujo de información ha recorrido también el camino inverso: se está utilizando los aceleradores de la física de partículas para comprobar una predicción de la cosmología. La predicción cosmológica que nos ocupa atañe al establecimiento de límites para el número de partículas fundamentales.

Por lo que sabemos, existen 12 partículas fundamentales junto con sus correspondientes antipartículas. Seis de las partículas fundamentales son los quarks, que llevan los caprichosos nombres de "arriba" ("up"), "abajo" ("down"), "encantado" ("charm"), "extraño" ("strange"), "cima" o "verdad" ("top" o "truth") y "fondo" o "belleza" ("bottom" o "beauty"). Se han descubierto todos los quarks excepto el quark cima. Aunque los argumentos teóricos a favor de la existencia de dicho quark son muy sólidos, no disponemos de ninguna prueba ex-



1. CONSTITUYENTES FUNDAMENTALES DE LA MATERIA son quarks y leptones. Se agrupan en familias, cada una de las cuales consta de dos tipos de cada clase de partículas. Las partículas se pueden distinguir, entre otras propiedades, por su carga eléctrica. Conocemos tres familias integradas por 12 quarks y leptones. Toda la materia ordinaria está formada por miembros de la primera familia. (Por poner un caso, el protón consta de dos quarks "arriba" y un quark "abajo".) Las teorías de la física de partículas brindan pocas predicciones acerca del número de familias que deben existir. Aunque, en principio, el número podría ser infinito, las teorías cosmológicas sugieren un límite de cuatro familias, límite que es hoy objeto de comprobación en los aceleradores.



2. CUATRO FUERZAS DE LA NATURALEZA dan cuenta de todas las interacciones conocidas entre las partículas elementales. La fuerte acopla los quarks, la fuerza débil es responsable de ciertas desintegraciones nucleares, la fuerza electromagnética acopla la carga eléctrica y la gravedad acopla las masas. Se cree que las cuatro fuerzas estuvieron en un tiempo unificadas, a las altas energías características del universo poco después de la gran explosión; se ha comprobado ya una teoría que unifica la fuerza débil y la fuerza electromagnética. Una teoría de gran unificación (TGU o GUT) uniría estas interacciones con la fuerza fuerte; una teoría de todo (TDT o TOE) describiría las cuatro fuerzas como diferentes aspectos de una sola fuerza.

perimental. Las otras seis partículas fundamentales son leptones: el electrón, el muon, la partícula tau y tres neutrinos asociados a cada uno de ellos, el neutrino electrónico, el neutrino muónico y el neutrino tauónico.

Las 12 partículas se agrupan en tres familias, cada una de ellas formada por cuatro miembros. La primera familia la componen los quarks arriba y abajo, el electrón y el neutrino electrónico; la segunda familia la forman los quarks encantado y extraño, el muon y el neutrino muónico; y la tercera, los quarks cima y fondo, la partícula tau y el neutrino tauónico. Toda la materia ordinaria está constituida por miembros de la primera familia. El protón, por ejemplo, consta de dos quarks arriba, cada uno de los cuales lleva 2/3 de la unidad de carga eléctrica positiva, y un quark abajo, que posee 1/3 de la unidad de carga eléctrica negativa. El neutrón consta de dos quarks abajo y un quark arriba. Cualquier átomo es un núcleo compacto de protones y neutrones fuertemente ligados y rodeado de una nube de electrones.

Toda la materia ordinaria está, pues, formada por miembros de la primera familia. ¿Por qué, se pregunta la física, existen otras familias y cuántas hay? Con la expresión zumbona de I. I. Rabi, ante el descubrimiento del muon: "¿Quién lo ha encargado?" Si nos dejamos guiar por la tendencia a encontrar nuevas partículas a medida que aumenta la energía de los aceleradores, habría que aceptar que las familias seguirán proliferando. La verdad es que las TGU propuestas apenas si se han pronunciado sobre el número total de familias. Por citar un caso, el primer modelo de TGU que adquirió cierta fama en la segunda mitad de la década de 1970, el SU(5) ("grupo especial unitario de matrices cinco por cinco"), acepta cualquier cifra.

Se aduce, sin embargo, una buena razón para contar, por lo menos, con tres familias. M. Kobayashi, del acelerador de protones japonés KEK, y T. Masakawa, de la Universidad de Tokyo, han indicado que la asimetría entre materia y antimateria observada en 1964 por Val L. Fitch, de la Universidad de Princeton, y James W. Cronin, de la Universidad de Chicago, se comprende mejor si hubiera al menos tres familias de partículas elementales. Dicha asimetría podría aportar la explicación del exceso de materia sobre antimateria que se observa en el universo y que posibilita que la materia exista [véase "Un defecto en un espejo universal", por Robert K. Adair; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1988]. Tener por lo menos tres familias no es un lujo superfluo.

Sin embargo, a uno le gustaría saber cuántas familias de quarks y leptones existen. Si los quarks y los leptones son los constituyentes fundamentales de la naturaleza, bueno sería conocer todos los componentes. En la hipótesis de que el número de familias fuera ilimitado cabría preguntarse si los quarks y los leptones son realmente elementales. De la misma manera que los átomos están formados por protones, neutrones y electrones, quizá los quarks y los leptones consten de entidades aún menores [véase " Estructura de quarks y leptones", por Haim Harari; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1983].

Nadie pone hoy en duda que la respuesta a la pregunta acerca del número de familias de quarks y leptones puede tenerla la cosmología. Sugiere ésta que debe haber un número finito de familias, y, además, restringe esa cifra a valores pequeños: sólo existen tres familias, o cuatro a lo sumo.

La predicción del límite del número de familias se basa en los datos obtenidos de la observación de los restos del mayor de todos los experimentos de acelerador, la gran explosión. El modelo de la gran explosión del universo empezó siendo una de las dos teorías cosmológicas rivales que animaron al debate en la década de 1950 y el inicio de la siguiente. La otra se conoce como la teoría del estado estacionario. Ambas surgieron con el propósito de explicar el descubrimiento de Edwin P. Hubble —en 1929— de la expansión del universo. El modelo de la gran explosión sostiene que hubo un momento en que el universo era caliente y enormemente denso, y que a medida que se fue expandiendo se ha venido enfriando y perdiendo densidad. La teoría del estado estacionario defiende la creación continua de materia; así, aunque el universo se haya expandido, su densidad ha permanecido constante.

La década de los sesenta respaldó, con distintas pruebas observacionales, el modelo de la gran explosión, hasta el punto de convertirla en teoría dominante al iniciarse la década siguiente. El apoyo más famoso llegó con el descubrimiento realizado por Arno A. Penzias y Robert W. Wilson, que les valió el premio Nobel. Si el modelo de la gran explosión fuera correcto, el universo habría adquirido, en algún momento, suficiente densidad y calor para que la materia hubiera generado un espectro característico de la radiación térmica. Por contra, y de acuerdo con la teoría del estado estacionario, la densidad del universo siempre habría sido la misma, de manera que el universo nunca se habría encontrado en un estado denso y caliente. No debería haber, pues, radiación térmica. Penzias y Wilson descubrieron una radiación de fondo de microondas, coherente con el planteamiento de calor y densidad que era de esperar en el marco de la teoría de la gran explosión.

Pero el principal respaldo que el modelo de la gran explosión tiene se lo ofrecen los estudios de la nucleosíntesis primordial: la formación de los elementos. Se necesitan temperaturas cerca-

nas a 100 millones de veces la temperatura ambiente para forjar muchos elementos partiendo de protones y neutrones; tales temperaturas se habrían registrado un segundo después de la gran explosión. Por tanto, midiendo la concentración relativa de los elementos, se puede adivinar las condiciones existentes en ese momento temprano del primer segundo después de la creación. Como punto de referencia, la radiación de fondo de microondas sólo es una reminiscencia del universo que data de 100.000 años después de la creación, cuando los fotones dejaron de colisionar con la materia a temperaturas de unos 3000 grados Kelvin (grados Celsius sobre el cero absoluto), unas 10 veces la temperatura ambiente.

Más adelante nos entretendremos en el proceso de nucleosíntesis de la gran explosión, pues no sólo ayuda a asentar el modelo de gran explosión, sino que nos lleva también a la física de partículas. Pero antes vale la pena recordar que la teoría de la nucleosíntesis de la gran explosión ha predicho la concentración de distintos elementos ligeros y sus isótopos: helio 3, helio 4, deuterio (el isótopo pesado del hidrógeno) y litio 7, entre otros. Las abundancias predichas abarcan casi 10 órdenes de magnitud. Las observaciones parecen verificar todas estas predicciones en sus detalles cuantitativos.

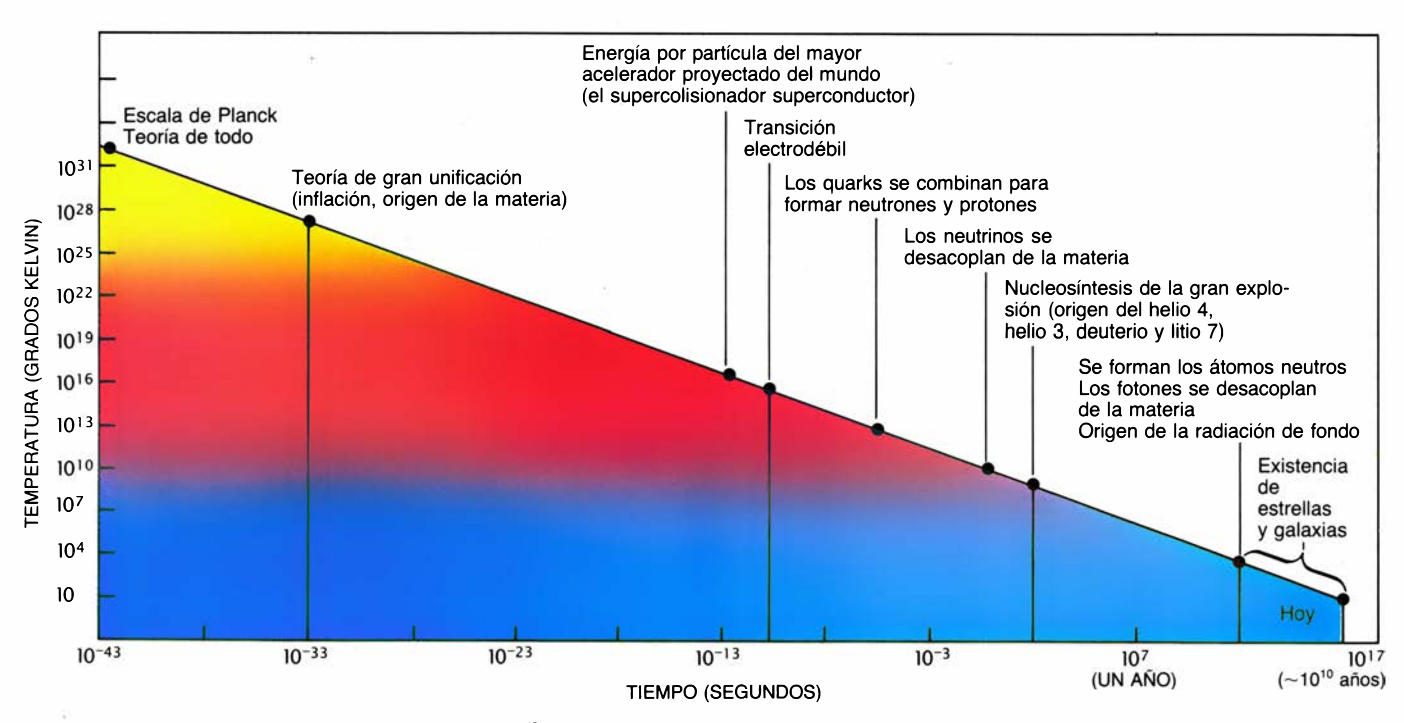
La impresionante concordancia entre las predicciones teóricas de la nucleosíntesis de la gran explosión y las concentraciones de los elementos ligeros observadas astronómicamente ofrece otra ventaja adicional. El acuerdo entre la teoría y la observación se produce para un valor de la densidad de protones y neutrones que es plenamente coherente con la densidad inferida por estudios de la dinámica de la materia luminosa del universo. Las predicciones basadas en la evolución del universo durante los primeros 1000 segundos que siguieron a la gran explosión corroboran las observaciones realizadas unos 10.000 millones de años después.

Los físicos poseen, eso creen, una comprensión *cuantitativa* del comportamiento del universo desde el instante de la nucleosíntesis de la gran explosión. Este conocimiento cabal ha brindado la confianza necesaria para remontarse más atrás en el tiempo, hasta el momento idóneo para el establecimiento de una TGU o una TDT.

La potencia de la teoría de la nucleosíntesis de la gran explosión se debe, esencialmente, a que todo cuanto hace falta introducir en las ecuaciones importantes nos es familiar por los experimentos de laboratorio. En particular, las temperaturas a las que se cree que ocurrió la nucleosíntesis de la gran explosión corresponden a energías que se exploran con aceleradores de energía relativamente baja, como los generadores de Van de Graaff. Quiere ello decir que el comportamiento de los núcleos atómicos bajo las condiciones de la nucleosíntesis de la gran explosión no es materia de hipótesis; se conoce con precisión.

Para calcular qué sucede, basta con seguir la evolución de un gas de neutrones y protones en un universo que se expande y enfría. Los neutrones y protones reciben el nombre común de nucleones, y ese gas, gas de nucleones. A temperaturas muy por encima de los 10.000 millones de grados Kelvin, que corresponden a instantes bastante anteriores al primer segundo después de la gran explosión, los protones y neutrones estaban en equilibrio y en iguales cantidades. Eran temperaturas demasiado altas para permitir la unión de protones y neutrones y crear así núcleos más complejos. Los choques con electrones y positrones (antielectrones) y neutrinos y antineutrinos mudaban los neutrones en protones y los protones en neutrones a ritmos casi iguales. Por ser el neutrón algo más pesado que el protón, los neutrones pasaban a protones más fácilmente que al revés. Sin embargo, cuando las energías eran muy altas, la diferencia de masas tenía un efecto despreciable.

Cuando la temperatura del universo bajó hasta 10.000 millones de grados Kelvin, la diferencia de masas resultaba ya significativa y la proporción de neutrones a protones cayó desde uno a

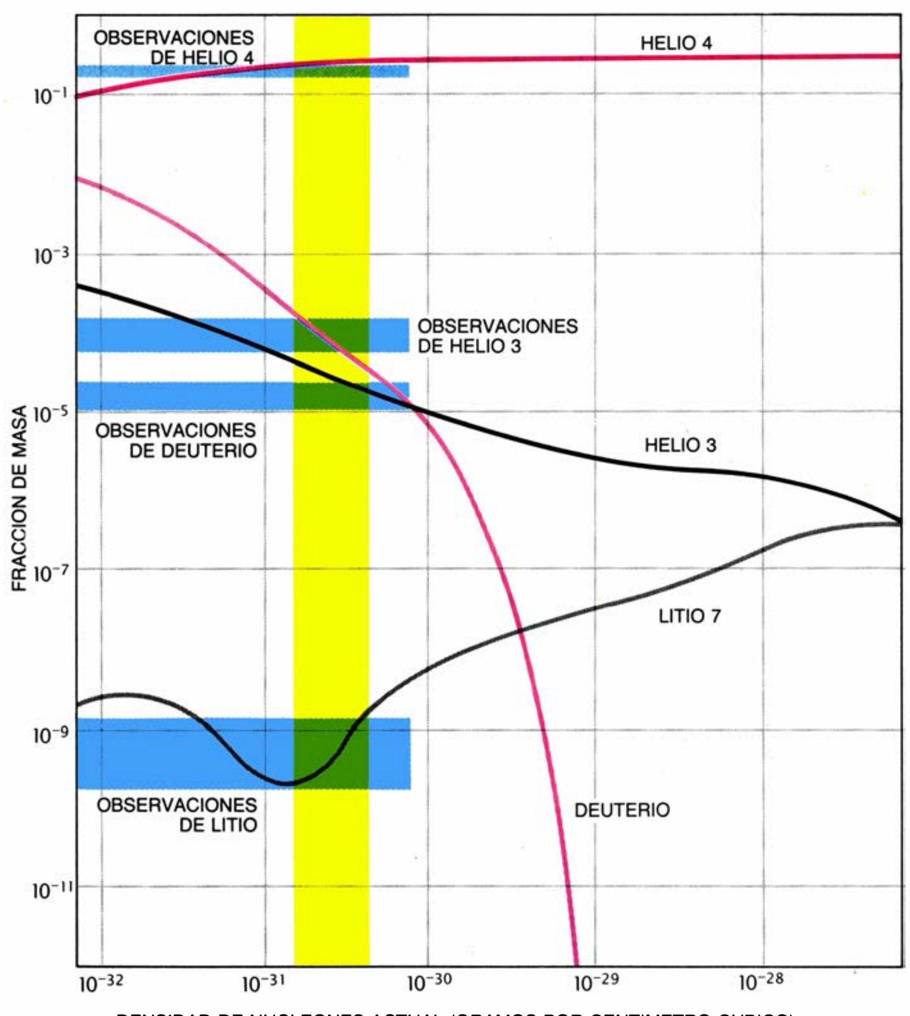


3. HISTORIA TERMICA DEL UNIVERSO, desde los 10^{-43} segundos tras la gran explosión hasta el presente. Muestra que la mayor parte del helio 4, el helio 3, el deuterio (hidrógeno pesado) y el litio 7 del universo se sintetizó un minuto después de la gran explosión. Los elementos más pesados se forjaron entre decenas de millones y miles de millones de años más tarde, en el interior de las estrellas. Estas últimas y las galaxias se formarían hace unos 10^{10} años.

menos de un tercio. Cuando el universo llegó a los 1000 millones de grados, la proporción era ligeramente inferior a un séptimo. En esa época la temperatura, suficientemente fría, posibilitó que los protones y neutrones se empezaran a unir en el más sencillo de los núcleos complejos: el deuterio, que consta de un protón y un neutrón. Las interacciones del deuterio con otros protones y neutrones produjeron tritio (un protón y dos neutrones) y helio 3 (dos protones y un neutrón). Estos núcleos interaccionan, a su vez, para producir helio 4 (dos protones y dos neutrones). El helio 4 está mucho más fuertemente ligado que ningún otro núcleo ligero; por tanto, el flujo de las reacciones convierte casi todos los neutrones existentes a 1000 millones de grados en helio 4. Cuando el helio 4 interaccionó primero con helio 3 y luego con tritio produjo una pequeña cantidad de berilio 7 (cuatro protones y tres neutrones) y de litio 7 (tres protones y cuatro neutrones). En resumen, se admite que la nucleosíntesis de la gran explosión generó helio 4 con trazas de deuterio, helio 3 y litio 7.

El flujo quedó casi interrumpido en el helio 4, por la sencilla razón de que no se produce ningún núcleo estable cuando un núcleo de helio 4 interacciona con un protón, un neutrón u otro núcleo de helio 4. La mayor parte del resto de los elementos se produjeron en el interior de estrellas, que tienen la densidad necesaria para permitir que tres núcleos de helio 4 se combinen y formen carbono 12.

La concentración de los elementos ligeros predicha por la teoría de la nucleosíntesis de la gran explosión, tal como la hemos esbozado, concuerda con la concentración observada. Según la teoría de la nucleosíntesis de la gran explosión, la materia empezó a agruparse cuando la proporción de neutrones a protones era de un séptimo. Ocurrió que la inmensa mayoría de neutrones se dedicaron a la constitución de núcleos de helio 4 (que contienen igual número de protones que de neutrones); por consiguiente, la concentración de helio 4 dará cuenta de aproximadamente la cuarta parte de la masa total de la materia ordinaria. Así sucede. La proporción de helio 4 observada en las galaxias, incluida la nuestra, oscila entre el 20 y el 30 por ciento. Las proporciones predichas para el deuterio, helio 3 y litio 7, que van desde menos de una parte en 10.000 hasta una parte en 10.000 millones, se ajustan también a las concentraciones que se observan.



4. CONCENTRACIONES PREDICHAS de helio 4, helio 3, deuterio y litio 7 en el modelo de la gran explosión del universo (*curvas*). Esas cifras concuerdan bastante bien con las proporciones observadas (*bandas horizontales sombreadas*). Las concentraciones predichas cambian en función de la densidad de nucleones (protones y neutrones) en el instante de la gran explosión ("big-bang"); las bandas verticales sombreadas indican la mejor estimación cosmológica actual de dicha densidad. Esta limpia concordancia constituye uno de los argumentos más sólidos con que cuenta el modelo predominante de la gran explosión.

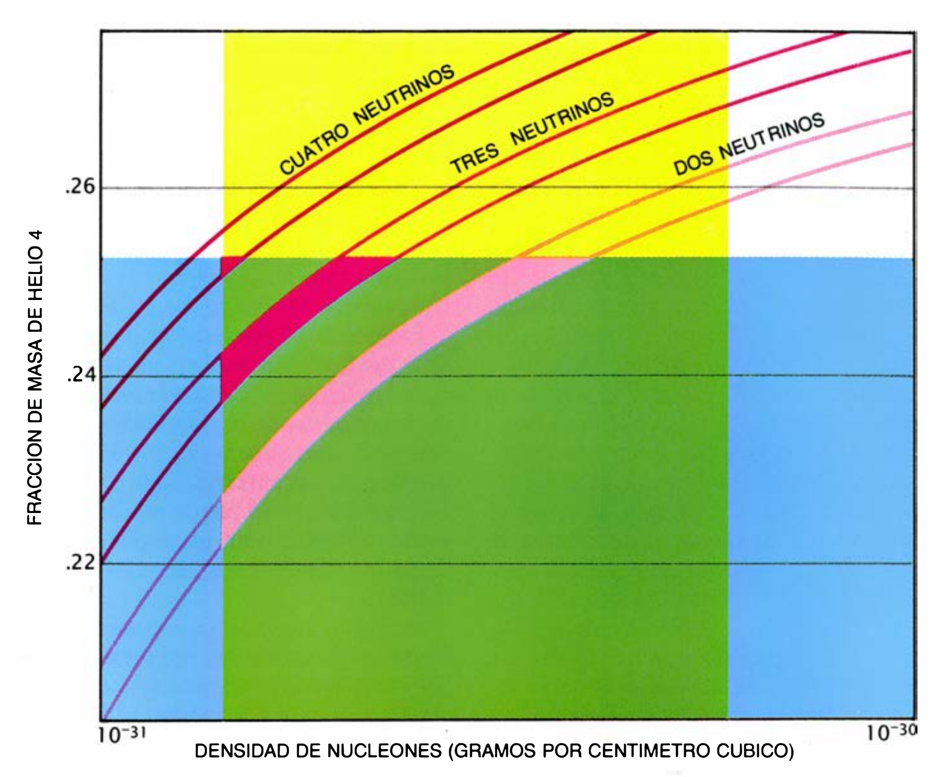
¿Cómo puede la teoría de la nucleosíntesis de la gran explosión limitar el número permitido de familias de partículas elementales? Muy sencillamente: si el número de familias excediera de tres o cuatro, la abundancia predicha de helio 4 superaría la concentración observada.

La razón de que se pueda sentar esta afirmación reside en las proporciones predichas de los elementos ligeros, que dependen sólo de dos variables: la densidad de los nucleones y la densidad de la radiación en el universo. Para nuestro infortunio, ninguna de estas variables se conoce con precisión. Ahora bien, sólo un pequeño intervalo de valores de cada variable da lugar a concentraciones coherentes con las observadas. Sustituyendo los valores de las cantidades observadas en las correspondientes ecuaciones, se puede determinar cuál será la densidad de los nucleones y de la radiación. El conocimiento de dichos valores conduce a algunas conclusiones interesantes.

La densidad de un gas de nucleones aumenta de forma directamente proporcional con el cubo de la temperatura; cuando la temperatura del universo duplicaba la actual, multiplicaba por ocho su densidad en nucleones. Determinando la densidad de nucleones que debía haber durante la nucleosíntesis para producir las concentraciones de deuterio, helio 3 y litio 7 que observamos hoy día, se puede calcular la densidad de nucleones actual. Se encuentra comprendida entre 2×10^{-31} y 5×10^{-31} gramos por centímetro cúbico. Este intervalo de valores se muestra en buen acuerdo con la densidad de materia luminosa deducida de los estudios de la dinámica de las galaxias y

de los cúmulos galácticos, y es 10 veces menor, por lo menos, que la densidad estimada de la masa gravitacional necesaria para cerrar el universo, es decir, para detener la expansión producida por la gran explosión. Para que el universo sea cerrado hace falta materia no nucleónica adicional. Se está buscando esa materia, que debe ser oscura, invisible a los telescopios, y formada por algo distinto de los nucleones [véase "Materia oscura del universo", por Lawrence M. Krauss; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1987].

Se sigue un razonamiento similar para la densidad de radiación, que justifica las limitaciones impuestas sobre el número de familias de partículas elementales. La densidad de radiación es importante para la nucleosíntesis de la gran explosión porque controló el ritmo de la expansión del universo en dicha etapa. La densidad de la radiación en cualquier instante es proporcional al número de clases de radiación, o lo que es lo mismo, al número de clases de partículas que se mueven a velocidad cercana a la de la luz. Se supone que, durante la nucleosíntesis de la gran explosión, había nueve clases de partículas relativistas: el fotón (desde luego), el electrón y el positrón, el neutrino eléctrónico, el neutrino muónico y el neutrino tauónico, así como sus tres antipartículas. Los neutrinos carecen de masa o, si tienen, es tan pequeña que viajan a una velocidad cercana a la de la luz; el electrón y el positrón poseen una masa, pequeñísima, que les permitió, a las altas energías que se daban en el instante de la nucleosíntesis primordial, correr a velocidades próximas a la de la luz. La densidad de radiación asociada con las nueve clases de partículas conduce a las condiciones que habrían producido la concentración de helio 4 observada. (Importa destacar que la densidad de helio 4 apenas si depende de la densidad de nucleones, un hecho que Fred Hoyle y su colega Roger Taylor descubrieron en la década de 1960 y que más tarde fue verificado con mayor rigor por otros investigadores.)



5. CONCENTRACION DE HELIO 4. Sugiere que hay a lo sumo cuatro familias de partículas elementales. Las tres curvas representan una ampliación de la porción de la curva del helio 4 que cae dentro de la banda vertical sombreada en la figura 4; la fina curva de dicha ilustración se resuelve en tres curvas anchas. La curva inferior muestra la concentración de helio 4 esperable en el caso de haber dos familias de partículas; la curva central muestra la proporción predicha para tres familias; la curva superior delinea la abundancia en la hipótesis de cuatro familias. Las concentraciones de helio 4 predichas para dos y tres familias de partículas entran cómodamente dentro de la región definida por las observaciones del helio 4 y las estimaciones de la densidad de nucleones (*región verde*). Una cuarta familia produciría una concentración muy próxima a los extremos permitidos. De acuerdo con la tesis del autor, no hay lugar, pues, para más de cuatro familias.

Al calcular la concentración del helio 4 hemos tenido en cuenta fotones, electrones y las tres clases conocidas de neutrinos, así como sus antipartículas. Si hubiera otras familias de partículas fundamentales, el cálculo debería modificarse. Los únicos miembros de una nueva familia que afectarían al cálculo serían los neutrinos, ya que, en cualquier familia distinta de la primera, son los únicos capaces de viajar a la velocidad de la luz o acercarse a dicha velocidad. Es presumible que cada nueva familia añadida a la tercera contribuiría con un neutrino y su correspondiente antineutrino.

Si el gas del que se fue formando el universo hubiera contenido neutrinos adicionales, su densidad de radiación hubiera sido mayor. Y, en consecuencia, hubiera sido más rápida la expansión cosmológica durante el período de la nucleosíntesis de la gran explosión. Pero sucede que la proporción de neutrones a protones es bastante sensible al ritmo de la expansión cosmológica. Un ritmo de expansión mayor hubiera significado que los neutrones habrían tenido menos tiempo para convertirse en protones: habría más neutrones, es decir, la proporción de neutrones a protones hubiera sido mayor. Como los neutrones pasan rápidamente a formar parte de los núcleos de helio 4, la concentración de éste hubiera sido mayor.

De los núcleos sintetizados en la gran explosión, el más abundante es el helio 4. Su concentración se mide con precisión. Ahora bien, el helio 4 se produce asimismo en las estrellas; importa, pues, estimar qué parte del helio observado en los objetos astronómicos es primordial —procedente de la gran explosión— y qué parte se ha generado en las estrellas después de ese inicio. En colaboración con John S. Gallagher, del Observatorio Lowell, hemos encontrado que la cantidad de helio 4 adicional producido por las estrellas puede inferirse midiendo el contenido en carbono de los objetos; las estrellas que forman helio, producen también carbono, de manera que la concentración del helio aumenta con la abundancia de carbono. Ello nos permite "sustraer" la contribución de las estrellas a la abundancia del helio 4 de la proporción observada, a fin de deducir la concentración primordial real. Hemos determinado que el máximo valor permitido de la abundancia de helio 4 primordial es ligeramente menor que el 25 por ciento.

Nuestros cálculos indican que esa baja concentración sólo podría haber surgido de la gran explosión si no existiese más que una clase adicional de neutrino y el correspondiente antineutrino. De haberse dado más neutrinos, la densidad de radiación hubiera alcanzado cotas tales que la cantidad de he-

lio 4 producida durante la nucleosíntesis de la gran explosión excedería a la abundancia observada. En otras palabras, el número total de familias de partículas elementales es de tres, o cuatro a lo sumo. Nuestro hallazgo sugiere que todas las familias fundamentales de partículas elementales pueden estar ya descubiertas. Este argumento básico lo planteamos nosotros hace ya más de diez años en colaboración con James E. Gunn, de la Universidad de Princeton; con posterioridad, las mediciones de la concentración de helio 4 y la estimación de su valor primordial han mejorado significativamente. Lo que confiere al argumento un toque de especial atracción y mantiene su actualidad es que ahora los aceleradores están empezando a comprobarlo.

La búsqueda de nuevas clases de neutrinos ha sido siempre tarea difícil y tediosa. Tradicionalmente, el único medio de descubrir un neutrino ha sido producir primero su leptón cargado asociado. Pero se trata de un método con un inconveniente grave: a pesar de ser los neutrinos bastante ligeros o incluso carecer de masa, se necesita una ingente cantidad de energía para producir los leptones asociados; cuanto mayor sea la masa del leptón asociado, mayor debe ser la energía del acelerador para producirlo. En el caso de la partícula tau, por ejemplo, su masa es tan alta que Martin L. Perl y sus colaboradores del Centro del acelerador lineal de Stanford (SLAC) consumieron varios miles de millones de electronvolt de energía, lo que correspondía a temperaturas que superaban los 10^{13} grados K, para encontrarla. Siguiendo este método siempre se puede aducir que el siguiente leptón está justo por encima de los límites de los aceleradores existentes.

El nuevo método para buscar neutrinos surgió a raíz de los experimentos del CERN mencionados antes, que demostraron que las fuerzas débiles y electromagnéticas constituían aspectos de una única fuerza electrodébil. En 1983, los investigadores del CERN, un equipo de cientos de físicos dirigido por Carlo Rubbia, alcanzaron el éxito en lo que se habían propuesto: consiguieron probar la existencia de los bosones vectoriales intermediarios, los supuestos portadores de la fuerza nuclear débil. Se encontraron tres de tales partículas: W^+, W^- y Z^0.

El descubrimiento del bosón Z^0 revistió especial interés para nuestro trabajo. El bosón Z^0 es eléctricamente neutro; puede, pues, desintegrarse en pares de neutrinos y antineutrinos, ya que éstos también son eléctricamente neutros. (El bosón Z^0 se puede también desintegrar en pares cargados de partícula-antipartícula, tales como electrones y positrones.) En otras palabras, el bosón Z^0 nos permite producir todas las clases de neutrinos directamente, sin tener que crear primero el leptón asociado. La vida media del bosón Z^0 constituye una medida del número de familias de las partículas elementales; en efecto, cuantas más familias haya, más posibilidades tiene la partícula de desintegrarse. Por tanto, un número elevado de familias redundaría en una vida media más corta para el bosón Z^0. La medición precisa de la vida media del bosón Z^0 puede así revelar el número de familias de partículas elementales.

Para medir las propiedades de desintegración del bosón Z^0 se necesita ante todo una máquina con suficiente energía para producir dicha partícula. Los viejos aceleradores, cuyo funcionamiento se basaba en haces de alta energía de electrones o protones que incidían sobre blancos estacionarios, desperdiciaban la mayor parte de su energía en el movimiento, y dejaban muy poca para la generación de partículas. El nuevo método utilizado por la máquina del CERN, que se vale de una idea de Simon van der Meer, consiste en obtener protones y antiprotones que choquen frontalmente, de manera que la mayor parte de la energía pueda utilizarse en producir nuevas partículas.

Varios aceleradores dispersos por todo el mundo remedan las colisiones frontales. El Tevatron del Fermilab hace chocar protones con antiprotones; el SLAC y el Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) provocan la colisión de electrones con positrones. Aunque las energías de los dos últimos, demasiado bajas, no pueden producir bosones Z^0 reales, sí pueden, a través de fenómenos mecánico-cuánticos, producir partículas "virtuales" que ejercen los efectos del bosón Z^0.

6. EXPERIMENTOS PARA DETERMINAR EL NUMERO DE FAMILIAS, que se están realizando en varios aceleradores de partículas dispersos por todo el mundo. Una partícula, conocida como el bosón Z^0, se puede desintegrar en quarks y leptones; cada partícula emparejada con su antipartícula. (Una antipartícula tiene la misma masa que su correspondiente partícula, aunque propiedades eléctricas opuestas; a menudo se representa mediante el símbolo de la partícula correspondiente con una barra encima.) Las desintegraciones permitidas se indican mediante líneas continuas. Cuantas más familias hubiera, más vías de desintegración podría seguir el bosón Z^0 y más corta sería su vida media. Las mediciones de la vida media señalan, por tanto, el número de familias. Las estimaciones actuales colocan el límite en cinco familias de partículas. Los futuros experimentos de los nuevos aceleradores deberán ofrecer resultados más precisos.

Los resultados provisionales de las máquinas indican que hay, a lo sumo, cinco clases de partículas elementales. David B. Cline, de la Universidad de California en Los Angeles y la Universidad de Wisconsin en Madison, y uno de los directores de los programas del CERN en el recuento de neutrinos, ha demostrado que la vida media del bosón Z^0 es aproximadamente la que se esperaría con sólo tres familias. Sin embargo, las incertidumbres experimentales admiten dos clases de neutrinos adicionales y, por tanto, dos familias más. Theodore L. Lavine, alumno de doctorado de Wisconsin, ha combinado los datos de SLAC y DESY, obteniendo un límite comparable acerca del número total de neutrinos que cifra en aproximadamente cinco. Por primera vez los aceleradores están contando las clases de neutrinos y van obteniendo un número pequeño, según predecía ya la teoría cosmológica y no podía hacerlo la teoría de partículas.

La próxima etapa promete ser más interesante. A medida que se acaben nuevos aceleradores y se empiecen a recoger más datos y más claros, el límite cosmológico de tres familias —cuatro a lo sumo— se comprobará con cabal precisión. Se está adaptando la máquina de SLAC para generar grandes cantidades de bosones Z^0; nos referimos al nuevo acelerador, o colisionador lineal de Stanford (SLC). También producirá grandes cantidades de bosones Z^0 otro acelerador, en fase de construcción en el CERN: el gran colisionador electrón-positrón (LEP) . Las máquinas sondearán el universo primitivo con una eficacia que nunca alcanzará ningún telescopio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COSMOLOGICAL LIMITS TO THE NUMBER OF MASSIVE LEPTONS. Gary Steigman, David N. Schramm y James E. Gunn en *Physics Letters*, vol. 66B, nº 2, págs. 202-204; 17 de enero de 1977.

THE EARLY UNIVERSE AND HIGH-ENERGY PHYSICS. David N. Schramm en *Physics Today*, vol. 36, nº 4, págs. 27-33; abril de 1983.

BIG BANG NUCLEOSYNTHESIS: THEORIES AND OBSERVATIONS. Gary Steigman y Ann Merchant Boesgaard en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 23, págs. 319-378; 1985.

NEUTRINO FAMILIES: THE EARLY UNIVERSE MEETS ELEMENTARY PARTICLE/ACCELERATOR PHYSICS. David B. Cline, David N. Schramm y Gary Steigman en *Comments on Nuclear and Particle Science*, vol. 17, nº. 3, págs. 145-161; 1987.

Ciencia y sociedad

El lenguaje de la traducción

Por fin, los biólogos moleculares están dando respuesta a una cuestión que les ha mantenido en vilo desde que se descifró el código genético, hace más de 20 años. Tiene que ver con el procedimiento que utilizan las células para interpretar el código en la síntesis de proteínas por ensamblaje de aminoácidos. Según se sabe, los "intérpretes" de la síntesis proteica son los diversos tipos de ARN de transferencia, o ARNt, ácidos nucleicos especializados en unirse, cada uno, a uno de los 20 amnioácidos que forman parte de las proteínas. Sin embargo, hasta la fecha ha permanecido sin saberse qué porción de la molécula del ARNt determina su especificidad respecto del aminoácido.

Recientemente, científicos de dos laboratorios han anunciado que, trabajando de modo independiente, han encontrado un determinante del ARNt que se une a la alanina. El hallazgo ha creado gran revuelo, pues promete llenar un conspicuo hueco de nuestro conocimiento sobre la fase de la síntesis proteica que denominamos traducción. El nexo de la traducción es una molécula de ARN mensajero que se copia del texto cifrado del ADN. Describe la secuencia de aminoácidos que componen una proteína. Las moléculas de ARNt colaboran en el ensamblaje aportando aminoácidos a la molécula de mensajero y leyendo el mensaje para determinar la posición que le corresponde a cada aminoácido en la secuencia.

Se creía que los rasgos que determinaban la identidad de los ARNt no ofrecían una definición estructural precisa. Todo lo contrario. Hace 14 años, Alexander Rich y sus colegas, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), dedujeron su estructura y comprobaron que todos los ARNt se parecían mucho. Se consideró entonces que los determinantes debían ser más sutiles, quizás unos pocos pares de bases de los ARNt.

Los trabajos sobre el tema languidecieron hasta que, en 1986, John N. Abelson y sus colegas, del MIT, pusieron a punto técnicas que permitían observar los efectos que ejercía sobre la especificidad de los ARNt la presencia de mutaciones. Un año después, aplicando esas técnicas, científicos del MIT generaron un juego de 30 mutantes del ARNt de la alanina. Ya-Ming Hou y Paul Schimmel, quien llevaba 20 años de trabajos sobre la identidad de los ARNt, descubrieron con sorpresa que la mayoría de las mutaciones no afectaban a la unión, hasta que modificaron un par de bases próximo al final de uno de los brazos de la molécula.

El efecto resultó espectacular: la mutación limitó gravemente la capacidad del ARNt para reconocer la alanina. Es más, manipulando otros ARNt y dotándoles de ese par de bases, mejoraba su capacidad de unión a la alanina. En un trabajo publicado en *Nature*, Hou y Schimmel concluían que ese par de bases, denominado 3-70 por la posición que ocupa en la molécula de ARNt, constituye uno de los determinantes principales de la identidad del ARNt para la alanina.

Schimmel envió sus primeros hallazgos a William H. McClain, de la Universidad de Wisconsin en Madison, que también investigaba el par 3-70. Poco después, éste obtenía resultados similares. Sin embargo, en una colaboración a *Science* compartida con su colega Kay Foss, McClain limita la trascendencia del par 3-70 y sostiene que no puede ser el responsable único de la especificidad del ARNt. Hou y Schimmel mantienen que sus resultados involucran a 3-70 más que los de McClain.

Ambos grupos prevén que en el próximo lustro se resolverán los determinantes de los 19 ARNt que restan, y temen que sean más complejos; quizá comprendan varios pares de bases, repartidos por la molécula. También advierten los investigadores que, aunque ya ha habido quien ha considerado los determinantes un segundo código genético, probablemente sus rasgos no sean sistemáticos y haya que revelar por ensayo y error la identidad de los 19 restantes.

Esqueleto genético

A primera vista, nadie diría que el citoesqueleto de las células de mamífero tuviera nada que ver con la expresión génica. El citoesqueleto, una compleja red de proteínas y otras moléculas, dota a la célula de forma y le permite moverse. Por su parte, los genes portan la información necesaria para la síntesis de proteínas. En contra de lo que cabría esperar, el citoesqueleto se está revelando como protagonista en el teatro del control de la expresión génica.

Débese el hallazgo a Theodore T. Puck, del Instituto Eleanor Roosevelt de Investigación del Cáncer, del Hospital Clínico de la Universidad de Colorado en Denver, y sus colaboradores, quienes trabajaron con una línea de células de ovario de hámster chino (CHO) aislada por Puck en 1958. En el laboratorio, las células CHO devienen espontáneamente cancerosas y exhiben varias características propias de las células tumorales. Pierden su forma habitual, alargada, y aparecen redondas y compactas. Además, muchos de sus genes se secuestran, es decir, quedan protegidos frente a la acción de sustancias que, en otras condiciones, les afectan.

El cambio de forma que sufren las células CHO resultan del desmantelamiento de su citoesqueleto. Puck y sus colaboradores demostraron tiempo atrás que la adición de AMP cíclico, AMPc, reorganizaba el citoesqueleto y les devolvía su morfología normal. Comprobaron también, para su sorpresa, que el AMPc exponía gran parte del material protegido.

¿Resulta aleatoria esa exposición o, por el contrario, afecta a determinados genes y, por tanto, constituye una forma de control genético? Esa era la pregunta que se plantearon Puck y sus colaboradores al iniciar sus trabajos más recientes. Analizaron el apantallamiento de determinados genes antes y después de añadir AMPc. Como indicador utilizaron la enzima ADNasa I, que fragmenta la cadena de ADN en sus subunidades.

Descubrieron que la exposición a la ADNasa era específica. Se analizaron 47 genes; 40 de ellos se mostraron resistentes a la ADNasa antes de la adición de AMPc. De los 40, 15 adquirían reiteradamente sensibilidad a la enzima tras el tratamiento con AMPc. Los restantes 25 conservaban la resistencia a la ADNasa después de añadir AMPc. Sin duda, los cambios que sufría el citoesqueleto dejaban expuestos algunos genes y otros no. La exposición de los genes a moduladores genéticos influye, así se cree, sobre la activación génica; debe aceptarse, pues, que el citoesqueleto interviene en la determinación de los genes a activar.

¿Cómo ejerce el citoesqueleto ese control de la expresión génica? No se sabe, pero Puck avanzó recientemente una explicación plausible. En todo momento, algunas partes de los cromosomas están sujetas a la cara interior de la membrana que rodea el núcleo celular. El enganche quizá exponga esos segmentos de ADN a moduladores genéticos. El citoesqueleto se extiende desde la membrana nuclear hasta la membrana externa, donde se reciben

las señales que transmiten las hormonas. Según Puck, quizá esos mensajes, tras su recepción en la membrana externa, se propaguen a través del citoesqueleto hasta la membrana nuclear y alteren el juego de genes sujeto a ella, modificándose así la pauta de expresión génica.

En *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Puck y sus colaboradores concluyen que "la reacción de exposición génica mediada por el citoesqueleto parece constituir un importante mecanismo de regulación genética de las células de mamífero". Es más, dada la manifiesta capacidad de la reacción del AMPc para devolver las células cancerosas a la normalidad, esa reacción podría revestir particular interés en la terapia del cáncer.

Ahorro de piel

¿Se debe a la reducción del ozono? ¿A un exceso de culto al sol? Cualquiera que sea la razón, la incidencia de melanoma está creciendo más deprisa que la de ningún otro cáncer. Según se estima, el 1 por ciento de los recién nacidos contraerá a lo largo de su vida esa neoplasia de las células cutáneas productoras de pigmento. El único tratamiento eficaz consiste en operar de inmediato el primer tumor; en cuanto se producen metástasis, el mal resulta casi siempre fatal. Pero, según afirman algunos investigadores, las vacunas podrían incluso prevenir su aparición.

Es cosa sabida en oncología que el sistema inmunitario reconoce y reacciona contra las células cancerosas del mismo modo que lo hace contra los patógenos foráneos. Pese a ello, ha tardado en admitirse la posibilidad de que las vacunas multipliquen las defensas naturales del organismo contra el cáncer (como ocurre con las infecciones microbianas inducidas, por ejemplo, la viruela o la polio); así lo afirma Jean-Claude Bystryn, del Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York, que desde hace 12 años investiga sobre vacunas contra el melanoma. Se están buscando vacunas contra distintos cánceres (pulmón, riñón y colon), pero los mayores esfuerzos se han dedicado a la del melanoma. Por dos razones, según Bystryn: debido a la dificultad de tratarlo y porque se entiende relativamente bien su interacción con el sistema inmunitario.

La vacuna desarrollada por Bystryn y sus colegas, de la Universidad de Nueva York, contiene sustancias que desprenden las células de melanoma mantenidas en cultivo. Durante los últimos cuatro años, sus creadores han ensayado la vacuna en 55 pacientes afectos de melanoma. Según informan en *Cancer*, la vacuna ha fortalecido o desencadenado la respuesta inmunitaria (que se traduce en la producción de anticuerpos y en el incremento de la reactividad de los glóbulos blancos) en la mitad de los pacientes; la enfermedad ha progresado más lentamente en éstos que en los que no respondieron a la vacuna.

Malcom S. Mitchell, del Centro Oncológico de la Universidad del Sur de California, informa de la obtención de resultados similares. En este caso se vacunaron 42 pacientes con una preparación de células de melanoma muertas; según Mitchell, en cerca de la mitad de los pacientes se redujo el tamaño del tumor y en unos cuantos remitió hasta desaparecer.

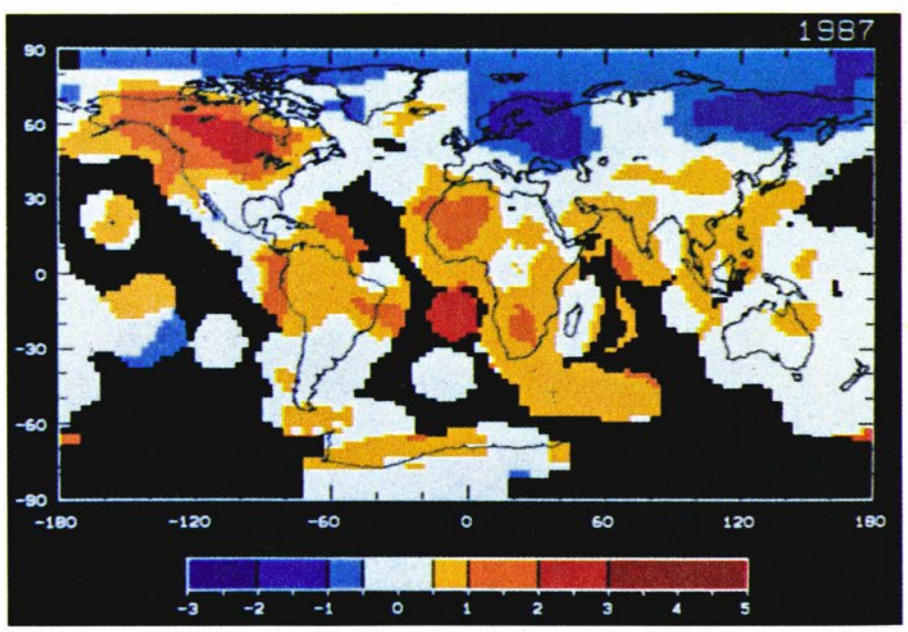
Bystryn juzga que "dada la juventud del campo, los resultados animan", si bien resalta la necesidad de insistir en las investigaciones para obtener una vacuna verdaderamente eficaz. Un paso importante hacia esa meta será determinar qué partes de la célula de melanoma pueden actuar de antígeno y cuáles pueden resultar superfluas o incluso dañinas. La tarea se vaticina ardua. Bystryn señala al respecto que las células de dos tumores de melanoma cualesquiera, incluso del mismo paciente, suelen presentar ligeras variaciones. Esa variabilidad explicaría por qué su vacuna y la de Mitchell evocaron la respuesta en unos pacientes sí y en otros no.

Cuando se demuestre la seguridad absoluta de esas vacunas y su efectividad en el tratamiento del melanoma, podría administrarse a personas que no hayan contraído el mal y que se consideren candidatos probables a padecerlo. Entre ellos se contarían quienes presentaran lunares de aspecto sospechoso y tuvieran antecedentes familiares de melanoma, así como los que, siendo de piel clara, tengan que estar muy expuestos al sol. Los ensayos realizados en animales parecen sugerir, según Bystryn, que la vacuna podría actuar como medida de prevención. El autor y sus colegas inocularon el producto en ratones y les inyectaron después una cantidad de células de melanoma suficiente para matar en dos meses los ejemplares sin vacunar; nueve de cada 10 ratones vacunados sobrevivieron.

Efecto invernadero

El año pasado fue el más cálido del que se guarde registro, según científicos británicos y norteamericanos. La temperatura global media, tomada con instrumentos situados en tierra y en el espacio, superó en 0,05 grados Celsius los dos máximos anteriores, correspondientes a 1981 y 1983. Los inusuales calores de la década de 1980 se dejan sentir, sobre todo, en el hemisferio Sur, donde siete de los ocho años más calurosos de que se tengan datos han coincidido en nuestra década.

Los investigadores, Philip D. Jones y Thomas M. L. Wigley, de la Universidad East Anglia, Sergej Lebedeff y James E. Hansenk, del Centro Espacial



1. TEMPERATURAS MEDIAS de 1987, el año más caluroso del que se guarda registro, mostradas en forma de desviaciones por encima y por debajo de las temperaturas medias de las tres décadas anteriores a la de 1980. Las unidades son grados Celsius

Goddard de la NASA, y otros, presentan sus valoraciones en una carta a *Nature*. Los últimos datos actualizan un estudio anterior según el cual la temperatura global media se había incrementado 0,5 grados Celsius desde los primeros datos fiables de que se disponía, correspondientes a 1861.

Advierten los autores que la elevación térmica de 1987 podría, en parte, ser consecuencia del intenso fenómeno de El Niño registrado en 1986-87, pero que el caldeamiento de los 80 "podría señalar las consecuencias del incremento de las concentraciones atmosféricas de CO_2 y de otros gases que influyen sobre la radiación".

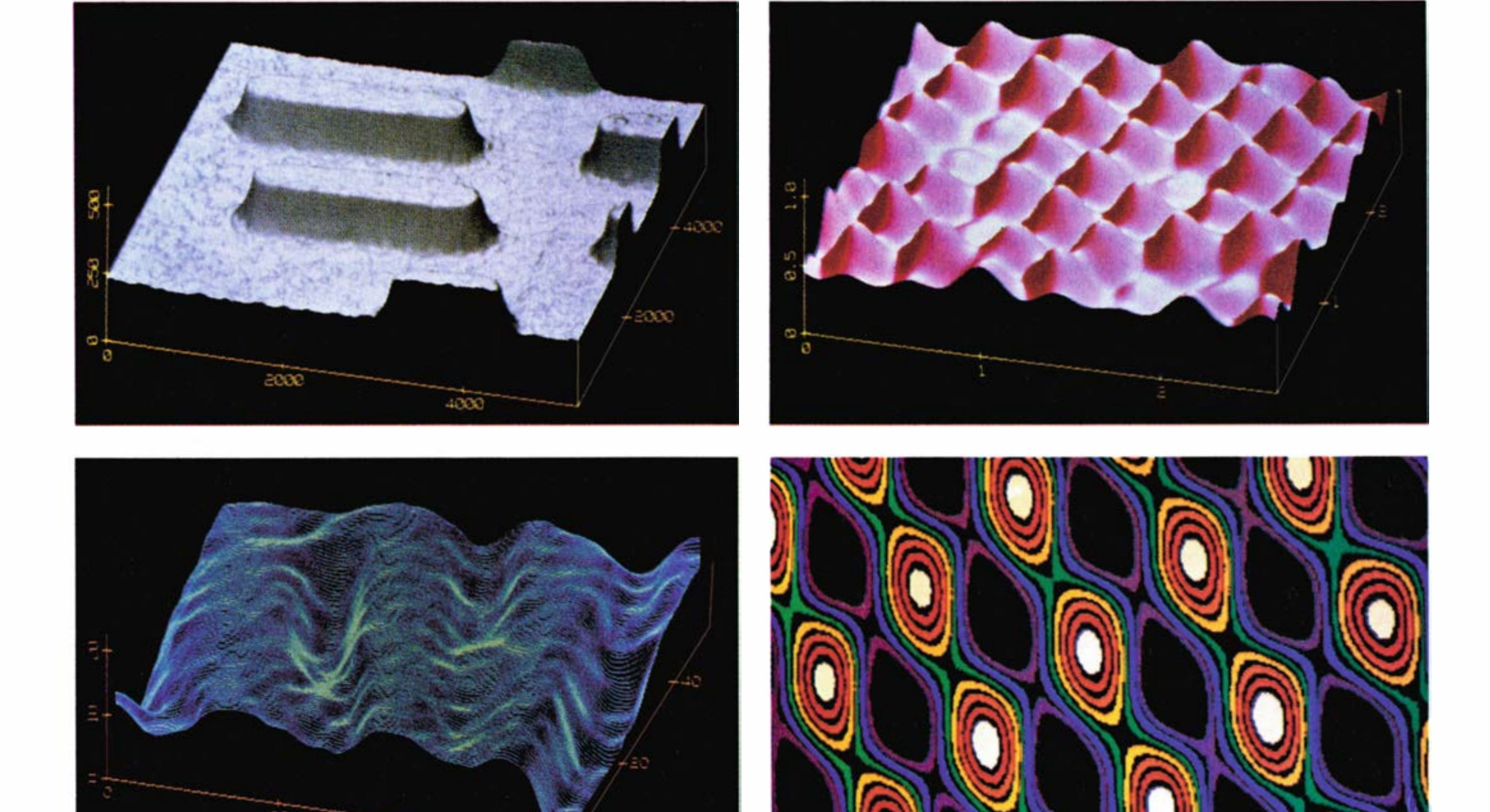
Los meteorólogos suelen coincidir en que el incremento persistente de las cantidades de dióxido de carbono, y de las trazas de otros gases, como metano y óxido nitroso, causará probablemente un caldeamiento global detectable en las próximas décadas. Esos gases absorben la radiación térmica emitida por la tierra que, al no escapar al espacio, caldea la atmósfera inferior (en eso consiste el efecto invernadero). La concentración de dióxido de carbono atmosférico es en la actualidad un 23 por ciento superior a los niveles anteriores a la revolución industrial, y crece un 0,4 por ciento cada año.

Puede que la elevación térmica de la década de 1980 sólo constituya una variación natural, como ocurrió ya en 1940, que registró un período suavemente cálido. Sin embargo, los estudios teóricos no animan a darse por satisfecho. Veerabhadran Ramanathan, de la Universidad de Chicago, escribió recientemente en *Science* que el caldeamiento superficial que se predecía "no tendría precedentes en un período interglacial". Según Wigley, el modelo sugiere que la temperatura global media debería haber ascendido entre 0,4 y 1,1 grados Celsius a lo largo del siglo pasado; la elevación real desde 1861 se encuentra, por consiguiente, en el extremo inferior del intervalo.

En los modelos quedan sin precisar importantes parámetros; a saber, no está claro el efecto retardador del caldeamiento que pueden ejercer los océanos, auténticos sumideros de calor. Ni se conoce, por otro lado, el alcance de los aerosoles liberados por las erupciones volcánicas. En veinte años habrá de revelarse si en verdad se está produciendo el ascenso térmico por efecto invernadero. "Hoy todo lo que podemos hacer es presentar los hechos; saquen ustedes las conclusiones", comenta Lebedeff.

Hijos del STM

A principios de la década de 1980, Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, del laboratoio de investigación que IBM tiene en Zurich, inventaron un dispositivo tan sensible a los contornos de las superficies conductoras de electricidad que "veía" los átomos. Los principios de ese microscopio de barrido de efecto túnel (STM, por *scanning tunneling microscope*) están alumbrando una nueva generación de instrumentos de exploración del dominio atómico. Con ellos puede estudiarse nuevas



2. MICROSCOPIO DE BARRIDO DE EFECTO TUNEL, cuya resolución permite controlar la calidad de una matriz de discos ópticos (arriba, a la izquierda)*. El STM revela la presencia, en la capa de teluro de un semimetal de bismuto-teluro-azufre, de protuberancias de menor altura correspondientes a átomos de azufre* (arriba, a a derecha)*; esos átomos adicionales explicarían por qué la sustancia contiene más azufre de lo predicho. El STM capta también las ondulaciones en fase de una membrana de fosfolípidos* (abajo, a la izquierda)*; Joseph A. N. Zasadzinski obtuvo la réplica en platino y carbono de la que se tomó la imagen. En otra, obra de Scot Gould, un microscopio de fuerza atómica resigue el patrón que forman los grupos metilo de un cristal del aminoácido leucina* (abajo, a la derecha)*. Las imágenes de STM se obtuvieron con equipos de Digital Instruments, Inc.; las unidades se dan en nanómetros*

propiedades de las superficies, como son los campos magnéticos y la temperatura.

El STM gobierna una aguja metálica en el espacio tridimensional, y lo hace con precisión de unidades angstrom (diezmilmillonésimas de metro). A la aguja se le aplica una diferencia de potencial, de suerte tal que, cuando la punta se encuentra a unos angstrom de distancia de una superficie, los electrones salvan de repente el hueco que los separa de ella (como si atravesaran un túnel). Este efecto mecánico-cuántico resulta ser exquisitamente sensible a la anchura de la separación: diferencias de un angstrom (menos que lo que mide el diámetro de un átomo) modifican la corriente de túnel en un factor de 10.

La aguja va recorriendo toda la superficie y un mecanismo de retroalimentación la sitúa a una distancia fija de ella, manteniendo constante la intensidad de la corriente. Un ordenador traduce el movimiento de la punta en un mapa topográfico de la superficie.

El STM sólo funciona en el caso de los conductores eléctricos. Los otros materiales deben primero recubrirse de una capa de metal, técnica que ha permitido obtener imágenes sorprendentes de las moléculas biológicas. Un equipo del Instituto Politécnico Federal suizo ha producido imágenes de complejos de ADN donde aparecen arrollamientos helicoidales que recuerdan las cuentas de un collar. Joseph A. N. Zasadzinski, de la Universidad de California, captó una membrana fosfolipídica, rizada como el cartón corrugado. Esa "fase de ondas", asegura, permite la expansión de las membranas pulmonares en las inhalaciones. Los recién nacidos prematuros que carecen de ellas padecen problemas respiratorios.

Otra estrategia para estudiar muestras no conductoras consiste en prenderlas a un superficie conductora, un cristal de oro, por ejemplo. Si la sonda empuja sobre la molécula con fuerza suficiente, los electrones la atravesarán. "Es como buscar conchas en la arena apretando la mano contra la superficie", aclara Stuart M. Lindsay, de la Universidad estatal de Arizona. En el caso del ADN, el efecto túnel se producía cuando la punta penetraba un angstrom en los 20 que tiene de grosor la molécula. Recientemente, Lindsay ha demostrado que pueden obtenerse imágenes de moléculas sumergidas en una solución acuosa. El procedimiento ofrece varias ventajas: las moléculas conservan su configuración natural y pueden controlarse y mantenerse puras en un medio líquido. Según el autor, la técnica podría revelar estructuras biomoleculares que hoy se conocen mal, e incluso captar el curso de una reacción, por ejemplo, la acción de una enzima sobre una molécula.

El fino control por retroalimentación introducido por el STM admite diversas aplicaciones. Binnig diseñó hace dos años una de las primeras: el microscopio de fuerza atómica. El instrumento trabaja con materiales no conductores, pues no se basa en la corriente de túnel. Utiliza una aguja de diamante, que, ejerciendo una presión de unos 4×10^{-7} gramos, barre la superficie como si se tratara de una aguja fonográfica. En las últimas versiones, un espejo instalado en la sonda refleja un haz láser, que ofrece una medición más fiable de la desviación de la punta que la corriente de túnel del STM.

El microscopio de fuerza atómica podría sondear semiconductores y otras superficies que se aíslan por oxidación. En ese sentido, el grupo de Paul K. Hansma, de Santa Bárbara, ha descubierto que, cuando se sumerge acero inoxible en agua de mar, al cabo de 15 minutos escasos, mucho antes de que ningún otro método detecte la existencia de corrosión, se han formado huequecillos diminutos. En el microscopio de fuerza atómica debe emplearse una aguja de punta mucho menor que en el STM. El grupo de Hansma selecciona las sondas por ensayo y error; explica él mismo: "compramos el primer diamante por seis dólares en una casa de empeños, lo rompimos a martillazos y elegimos un fragmento afilado".

H. Kumar Wickramasinghe, del Centro de Investigación Thomas J. Watson, de la IBM, dirige un grupo que está desarrollando miscroscopios que, en vez de captar la topografía de la superficie, detectan sus fuerzas magnéticas, electrostáticas e interatómicas de Van der Waals. En el microscopio de fuerza magnética de la IBM se aplica un potencial alterno a un "lector" piezoeléctrico, lo que provoca la vibración de un alambre magnético en su frecuencia de resonancia. En su rastreo, el alambre interactúa con los campos magéticos de la superficie y modifica su frecuencia de resonancia. Manteniendo la separación a una distancia tal que el alambre vibre a una frecuencia constante, el instrumento va cartografiando el perfil magnético de la superficie con una resolución de 500 angstrom. Promete una nueva herramienta de diagnóstico aplicable a discos magnetoópticos, discos de película fina y cabezales de grabación de película fina.

El grupo de IBM ha construido también lo que Wickramasinghe denomina "el menor termómetro del mundo". Por sonda, se utiliza una aguja de tungsteno, recubierta de aislante, salvo la punta, y rociada luego con otro metal. Se trata de un termopar, un dispositivo que genera un hueco de potencial cuando alguna fuente de calor caldea la capa metálica exterior. La superficie que va barriendo la sonda recibe el impacto de pulsos de luz láser; la punta detecta las moléculas que absorben la luz y se calientan. Se identifican los elementos que componen las moléculas por las longitudes de onda que absorben.

William J. Kaiser y L. Douglas Bell, del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL), ha extendido el alcance del STM más allá de la superficie de la muestra. Encontraron que, hasta que pierden energía, los electrones que saltan por efecto túnel penetran varios centenares de angstrom superficie adentro. Según Kaiser, esos electrones "balísticos" constituyen una "tenue luz que puede iluminar la búsqueda de lo que se encuentra por debajo de la superficie". Con la microscopía de emisión de electrones balísticos puede cartografiarse la barrera Schottky, un umbral de energía de la interfase crítica entre el metal y el semiconductor de los dispositivos microelectrónicos. Se mide la altura de la barrera incrementando el potencial de la sonda hasta que los electrones poseen energía suficiente para saltar la barrera. Las variaciones de la altura revelan la presencia de defectos, como la difusión de átomos del semiconductor al metal. El método ofrece, por primera vez, un procedimiento de estudio de esas importantes características.

Steven B. Waltman ha inventado también, junto con Kaiser, una sagaz aplicación del STM: un "sensor de efecto túnel", que podría montarse en un microcircuito. El sensor semejaría un trampolín instalado sobre una microscópica piscina. La sonda de efecto túnel, fijada al pie del trampolín, detectaría cualquier flexión. Con ese sensor podría fabricarse un acelerómetro 100.000 veces más sensible que los instrumentos en uso. En el JPL se está estudiando su instalación en las naves espaciales y se prevé su aplicación en robótica y biomedicina. Stephen L. Prusha, del JPL, investiga la posibilidad de implantar sensores en enfermos parapléjicos, para detectar el movimiento de las extremidades y enviar señales de retroalimentación hacia los estimuladores eléctricos de la musculatura, lo que les permitiría andar.

Perovskitas

Muchos superconductores de alta temperatura pertenecen a una familia de cerámicas llamadas perovskitas, cuya versátil estructura engendra materiales que ofrecen un amplio espectro de propiedades eléctricas

Robert M. Hazen

Hará tres años escasos, K. Alex Müller y J. Georg Bednorz, del laboratorio de investigación de la compañía IBM en Zurich, descubrieron un material que era superconductor a temperaturas superiores a las alcanzadas hasta entonces: no ofrecía resistencia al paso de electricidad a los 28 grados Kelvin (grados centígrados por encima del cero absoluto). Desde entonces, se han desarrollado otros superconductores de "altas temperaturas", que funcionan a 100 grados K o más. ¿Por qué los materiales son superconductores? La respuesta pertenece todavía al reino del misterio. Ello no obstante, varios grupos, incluido el del autor en el laboratorio de geofísica de la Institución Carnegie de Washington, han mostrado que los nuevos materiales comparten un mismo rasgo: son miembros defectuosos de la familia cristalográfica de las perovskitas.

Las perovskitas, que deben su nombre al material específico componente, son cerámicas (sólidos que combinan elementos metálicos con no metálicos, oxígeno por lo común) que tienen una especial disposición atómica. Se trata de los minerales más abundantes de la Tierra y, desde hace tiempo, tema de interés para los geólogos, gracias a su valor informativo para conocer la historia del planeta. Son también fascinantes desde una óptica tecnológica, porque las perovskitas naturales y sintéticas presentan una notable variedad de propiedades eléctricas. Mientras que una determinada estructura cristalina se asocia generalmente con una propiedad eléctrica específica, las perovskitas cubren toda la gama, desde aislantes (no conductores) hasta semiconductores, conductores superiónicos (en los que son iones, en vez de electrones, los que establecen un flujo a través del cristal), conductores semejantes a los metales y, ahora, superconductores de alta temperatura. Las perovskitas constituyen hoy la materia prima de una industria electrocerámica que mueve 20.000 millones de dólares anuales, cifra que dejarán muy atrás las aplicaciones de los superconductores de alta temperatura.

¿A qué obedece tan notable variedad de propiedades? Los propios defectos de los superconductores nos indican la respuesta: ligeras modificaciones de la arquitectura ideal de la perovskita producen, a menudo, nuevas propiedades. No existe una correlación directa, ya que una determinada modificación no produce automáticamente un grado particular de conductividad eléctrica. De hecho, cada vez que se altera la estructura ideal, surge la posibilidad de nuevas propiedades eléctricas.

Estructura de la perovskita

En su forma ideal, las perovskitas, que se describen por la fórmula generalizada ABX_3, constan de cubos compuestos de tres elementos químicos diferentes (A, B y X), presentes en una proporción de 1:1:3. Los átomos A y B son cationes metálicos (iones con carga positiva) y los átomos X son aniones no metálicos (iones con carga negativa). Un catión A –el mayor de las dos clases de metales– está en el centro de cada cubo, los cationes B ocupan los ocho vértices y los aniones X están en los puntos medios de las doce aristas del cubo [*véase la figura 2*]. Como cabría esperar, la perovskita mineral (variedad del titanato de calcio, $CaTiO_3$, que se forma a altas temperaturas) adopta la estructura ideal. Su celdilla unidad, o bloque básico, consta de un cubo. El calcio en la posición A es mayor que el titanio en las posiciones B, mientras que el oxígeno ocupa los doce sitios X. El cristal crece a menudo en forma de un cubo o un octaedro, reflejando la simetría de la estructura atómica.

Alguien que no esté familiarizado con los cristales podría muy bien preguntarse por qué un cristal compuesto de unidades que tienen un ion A, ocho iones B y doce iones X presenta la fórmula ABX_3 en lugar de AB_8X_{12}. La razón es que cada cubo está rodeado en todas sus caras por otros cubos, que comparten vértices y aristas. Así, cualquier cubo posee sólo una fracción de los átomos alejados. Cuando se tiene en cuenta esta compartición, se otorga a cada cubo un átomo A, un átomo B completo y tres átomos X completos también.

Para formar los cientos de perovskitas ideales o modificadas que se conocen actualmente podemos combinar múltiples elementos. El bario, el potasio y los elementos de la familia de las tierras raras (los que van desde el cerio al lutecio, números 58 a 71 en la tabla periódica de los elementos) son ejemplos típicos del par de docenas de elementos que pueden ocupar la posición A. Se conoce una cifra asombrosa, casi 50 elementos diferentes –más de la mitad de los elementos estables de la tabla periódica– capaces de ocupar sitios B. No sólo el oxígeno puede ocupar las posiciones X, sino que también pueden hacerlo miembros de la familia de los halógenos: flúor, cloro o bromo. Entre las docenas de compuestos que se adaptan a la estructura ideal de la perovskita, hay productos químicos muy diversos: fluoruro de plata y cinc ($AgZnF_3$), bromuro de cesio y cadmio

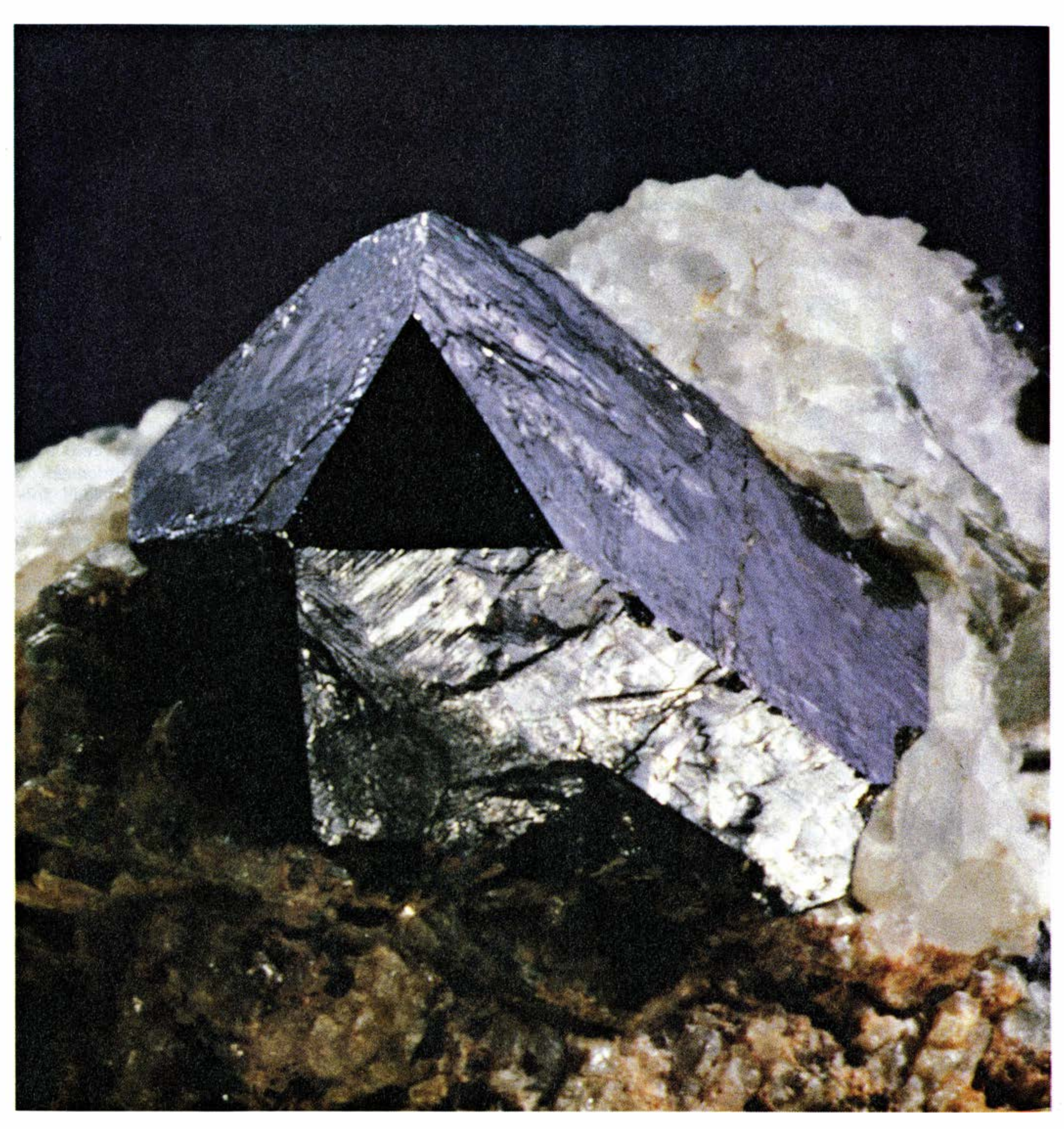
ROBERT M. HAZEN es mineralogista del laboratorio geofísico de la Institución Carnegie de Washington, donde trabaja desde 1976. Se doctoró, en 1975, por la Universidad de Harvard. Hazen dirigió el equipo que dedujo la estructura y la composición del superconductor de alta temperatura "1-2-3". Acaba de publicar *The Breakthrough*: *The race for the superconductor*, donde nos narra el descubrimiento y composición de este material.

($CsCdBr_3$), fluoruro de litio y bario ($LiBaF_3$), iodato potásico (KIO_3) y aluminato de europio ($EuAlO_3$).

Como otras cerámicas, estas perovskitas ideales son aislantes eléctricos: todos sus sitios atómicos están ocupados y fuertes enlaces iónicos —fuerzas atractivas entre cationes y aniones— retienen firmemente en su sitio a los átomos y sus electrones. En consecuencia, los electrones se mueven a través del cristal con dificultad. Los fuertes enlaces de la mayoría de las perovskitas ideales las asimilan también a las rocas, resistentes al rayado, difíciles de deformar y con un alto punto de fusión. Además, el hecho de que los enlaces a lo largo de los tres ejes del cubo sean semejantes lleva a la isotropía, o uniformidad tridimensional de propiedades: la compresibilidad, conductividad eléctrica u otras propiedades del material son las mismas a lo largo de cada eje.

No todas las perovskitas, sin embargo, se adaptan a este modelo de aislante isótropo. Algunas se apartan ligeramente de la forma y composición ideales y son, en consecuencia, menos predecibles.

Muchas perovskitas presentan cierta distorsión debido a que el catión central *A* es demasiado pequeño en relación a los cationes *B* que hay en los vértices del cubo. Semejante disparidad de tamaño provoca que los átomos *X* y, en



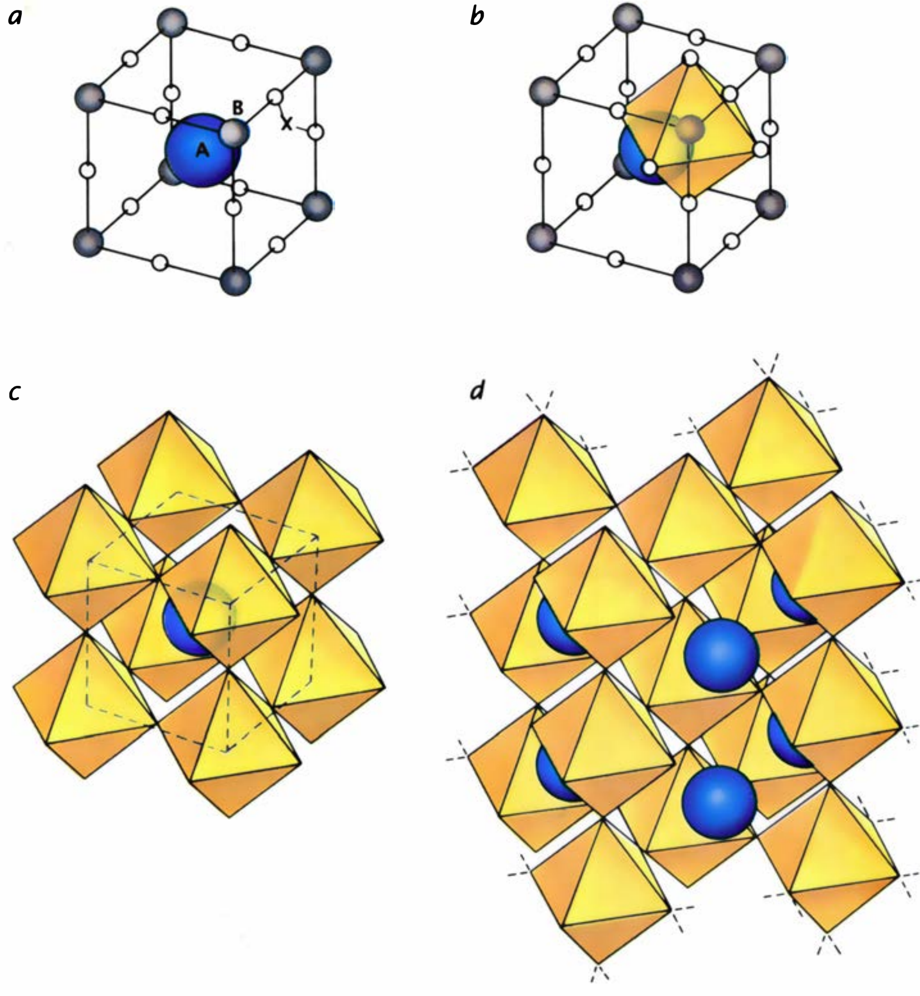
1. PEROVSKITA PROTOTIPICA (*fracción angular*), mineral escaso formado por titanato de calcio ($CaTiO_3$) a altas temperaturas. Otros compuestos de la familia de las perovskitas obedecen también la fórmula ABX_3, en la que *A* y *B* son metales y *X* es un no metal. Aunque la mayoría de las perovskitas naturales son aislantes eléctricos, ciertas desviaciones de la fórmula o de la disposición atómica estándar originan otras propiedades eléctricas. La perovskita constituye, de suyo, un aislante. Su descripción arranca de 1830; se debe al geólogo Gustav Rose, quien la bautizó así en honor de Lev Aleksevich von Perovski.

ocasiones, los B se desplacen de su posición.

Abundancia de alteraciones sencillas

Los cristalógrafos suelen representar estos movimientos asociando la celdilla unidad ideal a un cúmulo de poliedros y no a un cubo sencillo [*véase la figura 2*]. Cada catión B, que define el vértice de los cubos vecinos, está fuertemente unido a los seis aniones que le rodean, pertenecientes a cada una de las seis aristas del cubo que convergen en el vértice. Los aniones definen los vértices de un octaedro. El catión A, anteriormente visto como el centro de un cubo, se considera ahora rodeado por ocho octaedros con vértices compartidos, cada uno de los cuales contiene un catión B en el centro. Cuando el catión A es demasiado pequeño en relación a los cationes B, los octaedros, cuyos ejes están alineados en una perovskita ideal, se inclinan y giran; la estructura colapsa alrededor de los cationes A, bajando la simetría y alterando potencialmente las propiedades ópticas, elásticas, eléctricas, además de otras propiedades físicas. Se han identificado docenas de patrones de inclinación diferentes en las perovskitas.

En las perovskitas inclinadas, como en las formas ideales, los cationes B pueden permanecer en el centro de sus octaedros. En algunas perovskitas, sin embargo, los cationes B se desplazan ligeramente. Este "descentrado" de los cationes cargados positivamente puede producir cristales con polaridad eléctrica: un extremo se carga positivamente y el otro negativamente. Además, la dirección del descentrado puede cambiarse a menudo con sólo someter la muestra a un campo eléctrico. Los materiales que, además de polarizarse, pueden cambiar de polaridad bajo la influencia de un campo eléctrico se conocen como ferroeléctricos y hallan múltiples aplicaciones en los dispositivos electrónicos.



2. **UNIDAD ESTRUCTURAL BASICA de las perovskitas: el cubo (*a*). En el centro hay un átomo metálico (*A*), ocho átomos metálicos más pequeños (*B*) ocupan los vértices y 12 átomos no metálicos (*X*) están en los puntos medios de las aristas. Los átomos *A* y *B* son cationes, iones cargados positivamente; los átomos *X* son aniones cargados negativamente. (Las perovskitas tienen la fórmula ABX_3 en vez de AB_8X_{12}, porque cada catión *B* está compartido por ocho cubos vecinos y cada anión *X* por cuatro cubos.) Los cristalógrafos sustituyen a menudo el modelo cúbico por otro poliédrico (*b*). Los seis aniones que rodean cada catión *B* y están íntimamente ligados a éste forman los vértices de un octaedro (*amarillo*). En este modelo, la unidad básica estructural se convierte en un grupo de ocho octaedros que se encuentran unidos por los vértices y rodean a un catión *A* (*c*). El cristal es una red continua de tales agrupamientos (*d*). Estos dibujos poliédricos y los que se presentan a continuación se basan en imágenes generadas por ordenador y realizadas por Ross J. Angel.**

Una perovskita ferroeléctrica —el compuesto sintético titanato de bario ($BaTiO_3$)— es, quizá, la electrocerámica de uso comercial más conocida. Sus cationes descentrados almacenan y liberan energía eléctrica de manera aceptable: cuanto más intenso es el campo, tanto más energía adquieren y más se desplazan los cationes y el cristal se polariza más fuertemente. Cuando se retira el campo eléctrico, los cationes vuelven lentamente a sus posiciones normales y liberan la energía almacenada.

El titanato de bario suele incorporarse en los condensadores, elementos de los circuitos electrónicos que pueden filtrar un flujo desigual de corriente. Estos condensadores pueden almacenar la carga de los pulsos de corriente y liberar seguidamente la carga almacenada entre pulsos, produciendo así una corriente continua estable. El titanato de bario ha encontrado también una amplia aplicación en protectores de picos de tensión para ordenadores: cuando un pico de electricidad (por ejemplo, procedente de un rayo) alcanza el cristal, éste absorbe el pico y lo disipa lentamente.

Los cationes descentrados del titanato de bario favorecen la piezoelectricidad, una propiedad de interés comercial. Cuando un campo eléctrico externo desplaza los átomos de titanio, el cristal cambia de forma, alargándose un poco. Recíprocamente, la deformación mecánica de un cristal de titanato de bario genera un campo eléctrico. La piezoelectricidad hace que el titanato de bario sea muy apreciado en la fabricación de transductores, que convierten energía mecánica en energía eléctrica o viceversa. En los altavoces, por ejemplo, los transductores de titanato de bario vibran contra una membrana, en respuesta a señales electrónicas, generando ondas de sonido. En los micrófonos, estos transductores almacenan energía eléctrica que liberan, a continuación, en respuesta a la presión ejercida por las ondas de sonido.

Cationes mezclados

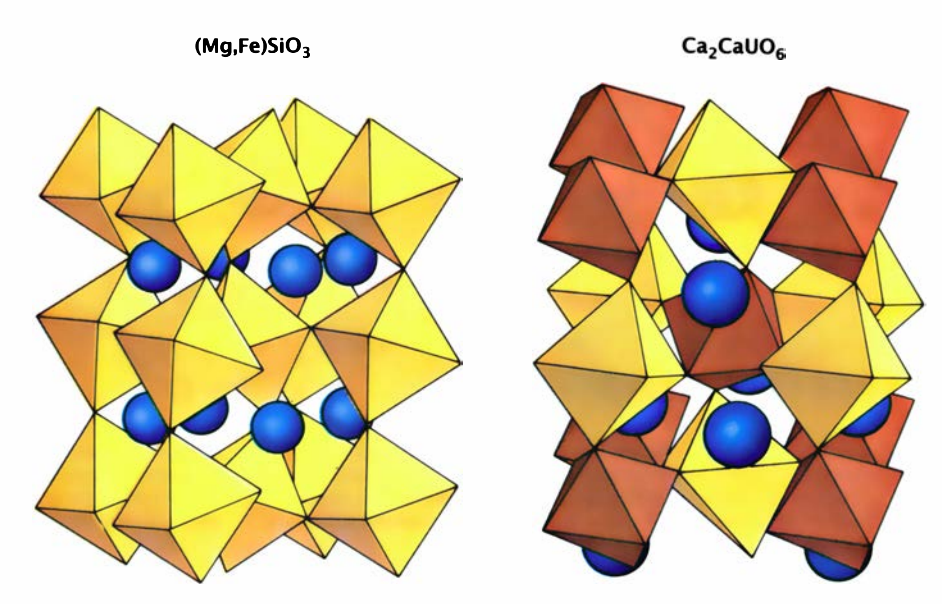
Las perovskitas que tienen cationes descentrados u octaedros inclinados responden, casi siempre, a la sencilla

fórmula ABX_3. A pesar de ello, éstas y otras perovskitas pueden desviarse también de la composición ideal: sus lugares *A* o *B* pueden ocuparse con dos o más tipos de cationes. En el óxido de calcio y uranio (Ca_2CaUO_6), por ejemplo, los átomos de calcio ocupan todos los lugares *A* disponibles, pero los sitios de los octaedros *B* se reparten equitativamente entre iones de calcio y de uranio. Los cationes *B* "se ordenan", o alternan estrictamente sus posiciones, por toda la estructura, que se inclina porque los iones de calcio de las posiciones *B* son bastante mayores que los iones de uranio.

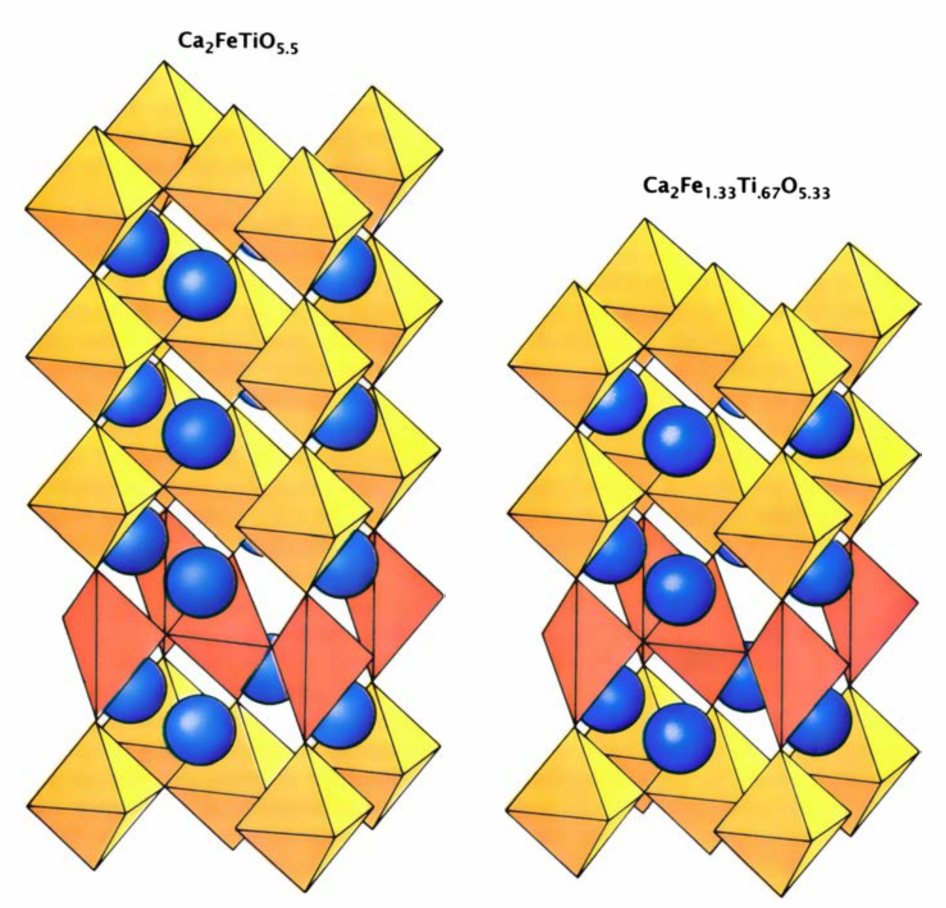
Los centros de los octaedros pueden estar ocupados no sólo por dos elementos diferentes, sino también por iones del mismo elemento con cargas diferentes. El óxido de bario y bismuto, un brillante semiconductor bronceado, que se describe a veces por la fórmula $BaBiO_3$, es una perovskita del tipo de "valencia mezclada": tiene dos variedades distintas de cationes de bismuto, uno que ha cedido tres electrones de valencia (electrones de su capa orbital más externa) y otro que ha cedido cinco. La designación normal es por tanto $Ba_2Bi^{3+}Bi^{5+}O_6$. Como ocurre para el óxido de calcio y uranio, los octaedros que contienen los dos tipos de cationes se alternan por todo el cristal.

El óxido de bario y plomo ($BaPbO_3$), un conductor negro de apariencia metálica, constituye una demostración espectacular de los cambios que pueden ocurrir en las propiedades ante ligeras variaciones de los elementos que ocupan las posiciones *B*. Reemplazando progresivamente plomo por bismuto, se crea una "serie continua" de variantes en la composición, desde el óxido de bario y plomo hasta el óxido de bario y bismuto. Cuando la composición se aproxima a $BaPb_{0,8}Bi_{0,2}O_3$, el compuesto se torna semiconductor. Además, a diferencia del óxido de plomo y bario o del óxido de bario y bismuto, algunos de los compuestos intermedios se hacen superconductores cuando se enfrían casi hasta el cero absoluto.

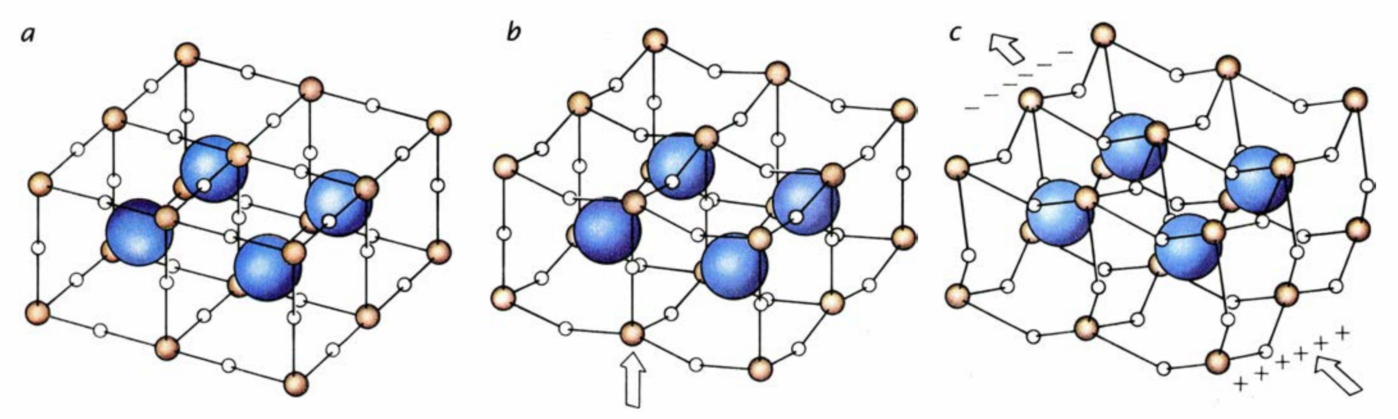
Las sustituciones de cationes *B* son las que actúan en el grupo de perovskitas de interés comercial que reciben la denominación conjunta de *PZT*. Bajo la misma se encuadra el titanato de plomo ($PbTiO_3$) y la serie continua creada cuando el circonio sustituye al titanio hasta que se forma el circonato de plomo ($PbZrO_3$). Todos los cristales *PZT* presentan un efecto piezoeléctrico de notable intensidad (cualquier ligera compresión puede producir el almacenamiento y la liberación de 100 volt de



3. DESVIACIONES DE LA FORMULA Y DE LA ESTRUCTURA ESTANDAR DE LA PEROVSKITA se ponen de manifiesto en el silicato de magnesio y hierro y en el óxido de uranio y calcio. En el primer compuesto (*izquierda*), dos elementos distintos (magnesio y hierro) pueden ocupar la posición *A* (*azul*), obteniendo la fórmula $(Mg,Fe)SiO_3$. En el óxido de uranio y calcio (*esquema de la derecha*), este último elemento es el único que ocupa la posición *A*, pero se alterna también con el uranio en las posiciones *B*; la fórmula del compuesto es Ca_2CaUO_6. En el silicato de magnesio y hierro, las unidades estructurales de octaedros se inclinan porque ambos tipos de cationes *A* son demasiado pequeños para mantener los octaedros con silicio en el centro en una posición más erguida. En el óxido de uranio y calcio, son los cationes *B* los que se encuentran defectuosamente emparejados: los octaedros se salen de su posición porque los que tienen calcio en el centro (*amarillo*) son muchos mayores que los que tienen uranio en dicha posición central (*rojo*).



4. ESTRUCTURA ESTRATIFICADA que surge a veces en las perovskitas a las que les falta un complemento pleno de átomos de oxígeno. Capas enteras de octaedros se sustituyen por poliedros menores. En dos de los compuestos pobres en oxígeno que se obtienen cuando el hierro sustituye parcialmente al titanio en el titanato de calcio —$Ca_2FeTiO_{5,5}$ (*dibujo de la izquierda*) y $Ca_2Fe_{1,33}Ti_{0,67}O_{5,33}$ (*esquema de la derecha*)— cada cuatro o tres capas respectivamente, una consta de tetraedros con hierro situado en posición central (*rojo*).



5. TITANATO DE BARIO ($BaTiO_3$). Se adapta a la fórmula estándar de las perovskitas ABX_3, si bien se desvía de una verdadera estructura cúbica (*a*) ya que sus cationes *B* (titanio) se hallan ligeramente descentrados (*b*). En consecuencia, el cristal se polariza. Cuando se le somete a un campo eléctrico (*c*), la orientación de los iones de titanio se desplaza hacia el electrodo cargado negativamente. Al cambiar la orientación, lo hace la forma del cristal de titanato de bario. Este fenómeno de piezoelectricidad constituye la base de muchos dispositivos electrónicos. (Se ha exagerado el desplazamiento de los átomos de Ti.)

potencial eléctrico); se encuentran en múltiples dispositivos: altavoces, relés eléctricos, medidores de presión y bujías para segadoras de césped. Los cristales *PZT* de diferentes composiciones vibran a distintas frecuencias en respuesta a un campo eléctrico. Los diseñadores de televisión han aprovechado este efecto de la composición y emplean corrientemente varias perovskitas *PZT* como filtros para reducir el ruido molesto: los cristales interceptan los impulsos eléctricos que llegan y enmascaran las frecuencias no deseadas.

Cationes *A* múltiples

Otra forma de variación en la composición —cationes múltiples en las posiciones *A*— puede controlar las propiedades del interior de la Tierra. El autor y sus colegas han estudiado intensamente en el laboratorio el silicato de hierro y magnesio, $(Mg,Fe)SiO_3$, que adopta la estructura de perovskita a presiones de varios cientos de atmósferas. Los paréntesis indican que las proporciones del magnesio y de hierro que ocupan los sitios *A* pueden variar. Dada la exigua magnitud del magnesio y el hierro, los octaedros de oxígeno que encierran a los átomos de silicio de los vértices no pueden permanecer erguidos, sino que se inclinan.

Los estudios de alta presión sugieren que el silicato de magnesio y hierro y el silicato de calcio ($CaSiO_3$), que adopta también la estructura de perovskita cuando se halla sometido a una gran presión, son probablemente los minerales predominantes en el manto inferior terrestre, región que se extiende desde una profundidad de alrededor de 670 kilómetros hasta alrededor de 2900 kilómetros y constituye más de la mitad del volumen de la Tierra. Los estudios realizados sobre los minerales de silicatos del manto superior como granates, olivinos, espinelas y piroxenos muestran que estos silicatos se transforman a las presiones y temperaturas de las profundidades terrestres, combinándose con otros minerales para formar rocas en las que predominan silicatos de calcio y de magnesio y hierro del tipo de la perovskita. Estos estudios sugieren también que, cuando los átomos de hierro en el silicato de magnesio y hierro tienen una carga de +2, la perovskita resultante es un aislante; cuando los átomos tienen una carga de +3, la perovskita puede convertirse en un conductor más eficiente del calor y la electricidad.

Si las perovskitas de silicatos ricas en hierro +3 abundaran en el manto inferior, la Tierra podría ser un conductor mejor de lo que se ha pensado. El hallazgo de pruebas adicionales que apoyen esta posibilidad exigiría replantearse las hipótesis admitidas sobre la temperatura inicial de la Tierra, la velocidad a la que se ha enfriado y la rapidez con la que puede perder calor en el futuro. El autor y sus colegas tienen el proyecto a corto plazo de llevar a cabo estudios a altas presiones y temperaturas para comprobar los conocimientos aceptados.

El hierro y el magnesio aparecen al azar en las posiciones *A* del silicato de magnesio y hierro, pero este desorden es pequeño comparado con el que se encuentra en diversas perovskitas naturales cristalizadas en el magma volcánico. Estas rocas, que incluyen la latrapita, la loparita, la leusita y otras perovskitas afines, incorporan una amplia variedad de elementos exóticos. Como grupo, admiten el calcio, el sodio, el potasio, el itrio y los catorce elementos de las tierras raras en los sitios *A*; titanio, niobio, hierro, magnesio, manganeso y cinc ocupan sus posiciones de cationes *B*. En virtud de la estructura de la perovskita, muy versátil, estos minerales actúan a modo de esponjas, absorbiendo diversos elementos que no se adaptan fácilmente en otras estructuras minerales. Las perovskitas que se obtienen están muy desordenadas: una muestra determinada puede contener una veintena de cationes *A* distintos y una docena de cationes *B*, todos aparentemente distribuidos al azar en sus respectivos sitios.

Complejidad añadida

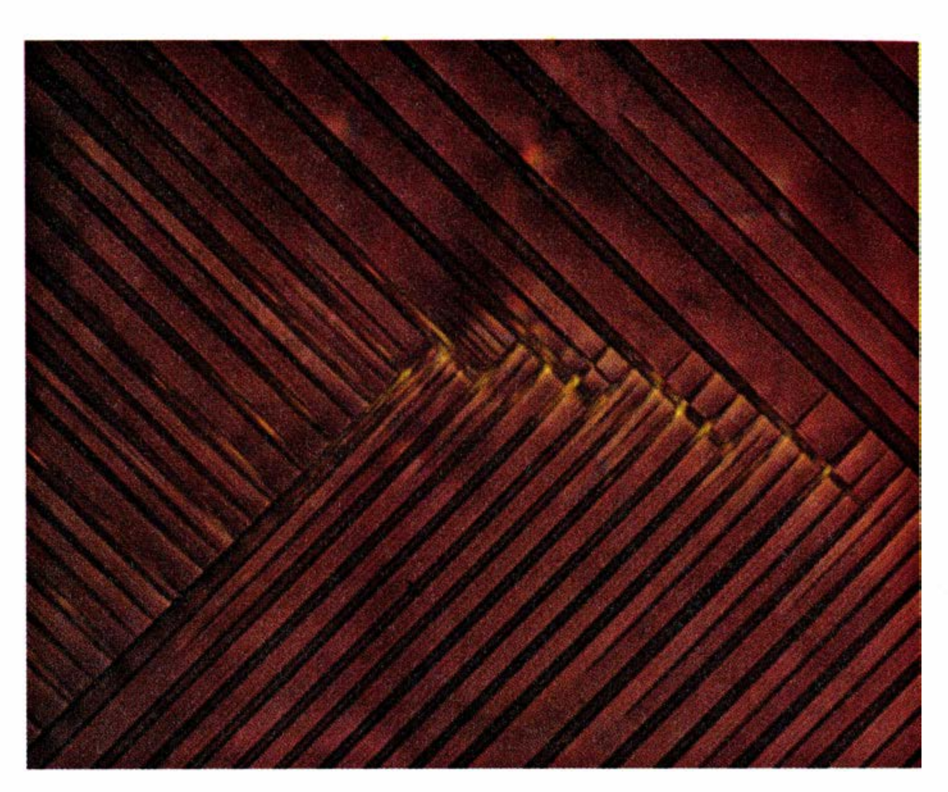
Todas las perovskitas descritas hasta ahora son estequiométricas, sin importar la magnitud de su distorsión ni su composición variable: tienen un total de dos cationes por cada tres aniones. Hay otras perovskitas o estructuras relacionadas con éstas que no son estequiométricas: se apartan de la fórmula ideal ABX_3 ya que poseen sitios vacantes donde normalmente estarían los átomos.

Los compuestos en la serie continua desde la perovskita ($CaTiO_3$) hasta la ferrita de calcio deficiente en oxígeno ($CaFeO_{2.5}$) ilustran bien las consecuencias estructurales de los átomos que faltan. En los compuestos pobres en oxígeno por encima del titanato de calcio —$Ca_2FeTiO_{5.5}$ y $Ca_2Fe_{1.33}Ti_{0.67}O_{5.33}$, por ejemplo— la falta de oxígeno produce capas que constan de cationes *B* de hierro rodeados por cuatro átomos de oxígeno, en vez de los habituales seis. Estas capas están entremezcladas con las que tienen octaedros normales [*véase la figura 4*]. El volumen del cristal no es uniforme, sino que crece en cristales planos, en forma de placas, lo

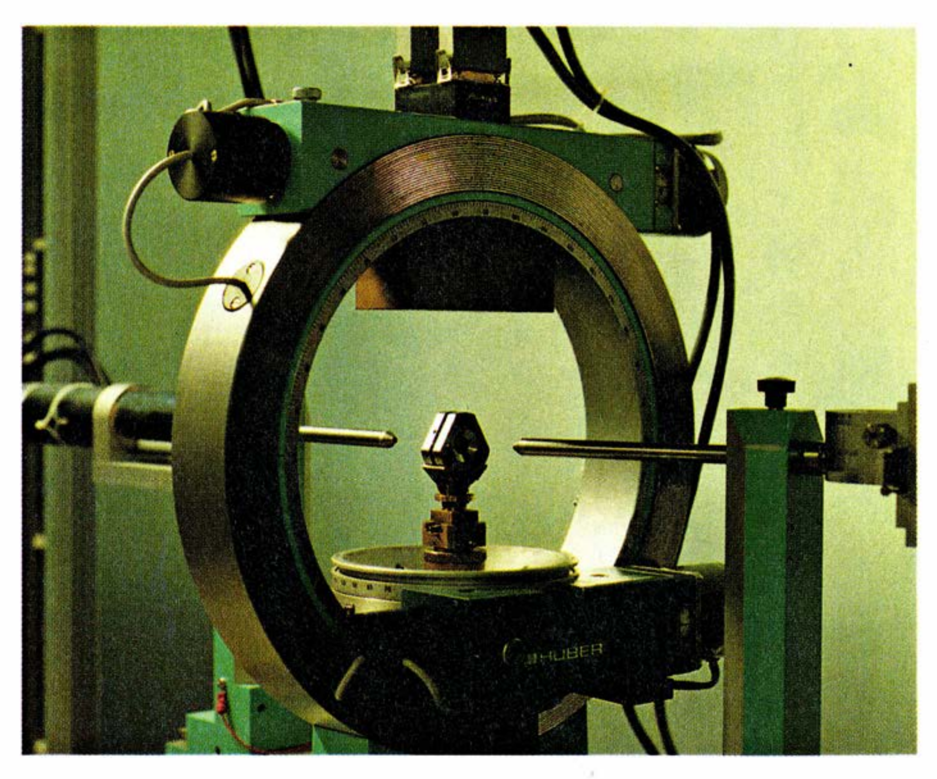
que refleja su disposición atómica estratificada.

Esa falta de estequiometría, la inclinación de octaedros, los cationes descentrados y los cationes múltiples, entre otras complejidades, pueden suceder simultáneamente en casi cualquier combinación. En realidad parece posible un número infinito de variantes de perovskitas; a pesar de todo la situación es incompleta. En una perovskita uniforme, se puede predecir teóricamente la disposición atómica de una sección de un cristal analizando otra sección, incluso en un cristal que posea octaedros inclinados o cationes alternantes. Cierto es que la mayoría de las perovskitas, como otros tipos de cristales, no son uniformes sino que están llenos de defectos, fallos aleatorios que no pueden anticiparse. Entre los múltiples microdefectos que pueden ocurrir citemos: un cubo desplazado de lugar, un poliedro inclinado anómalamente, una capa de un tipo donde, por lo común, se formaría una de otro tipo, una rotura en una secuencia alternativa de cationes y defectos locales, que aparecen cuando falta un átomo sencillo o se sustituye por un elemento errante.

Los defectos de las perovskitas pueden producirse también a gran escala. Por ejemplo, en el caso de cierto fenómeno de maclación ("twinning"), grandes secciones de un cristal pueden ser idénticas a otras, si bien se orientan en direcciones diferentes. (Los límites de estas maclas aparecen a menudo como estrías en el volumen del cristal.) Característica habitual de las perovskitas, la maclación ocurre probablemente en cualquier muestra que se desvíe de la forma cúbica ideal; ejerce efectos drásticos —favorables y desfavorables— sobre las propiedades eléctricas. Por ejemplo, los campos eléctricos pueden producir un desplazamiento de los límites de las maclas, un proceso que consume energía y reduce potencialmente la polarización de las perovskitas ferroeléctricas. Para asegurar prestaciones fiables en las aplicaciones comerciales, los fabricantes introducen impurezas que "fijan" los límites de las maclas y evitan que se muevan. Así, se añade manganeso para fijar los límites en el titanato de bario, que invariablemente presenta maclación.



6. SECCION TRANSVERSAL de un cristal de titanato de bario que revela un defecto común en las perovskitas: maclación, o formación de dominios esencialmente idénticos que se orientan de forma diferente. En esta figura, los diagramas de franjas que se distinguen en los dos grandes dominios reflejan las diferencias en el descentrado del titanio, fenómeno característico del titanato de bario. Los átomos de titanio instalado en las franjas claras y oscuras contiguas están desplazados en direcciones opuestas. La muestra, suministrada por Robert D. Shannon, aparece en color púrpura porque se fotografió con luz polarizada.



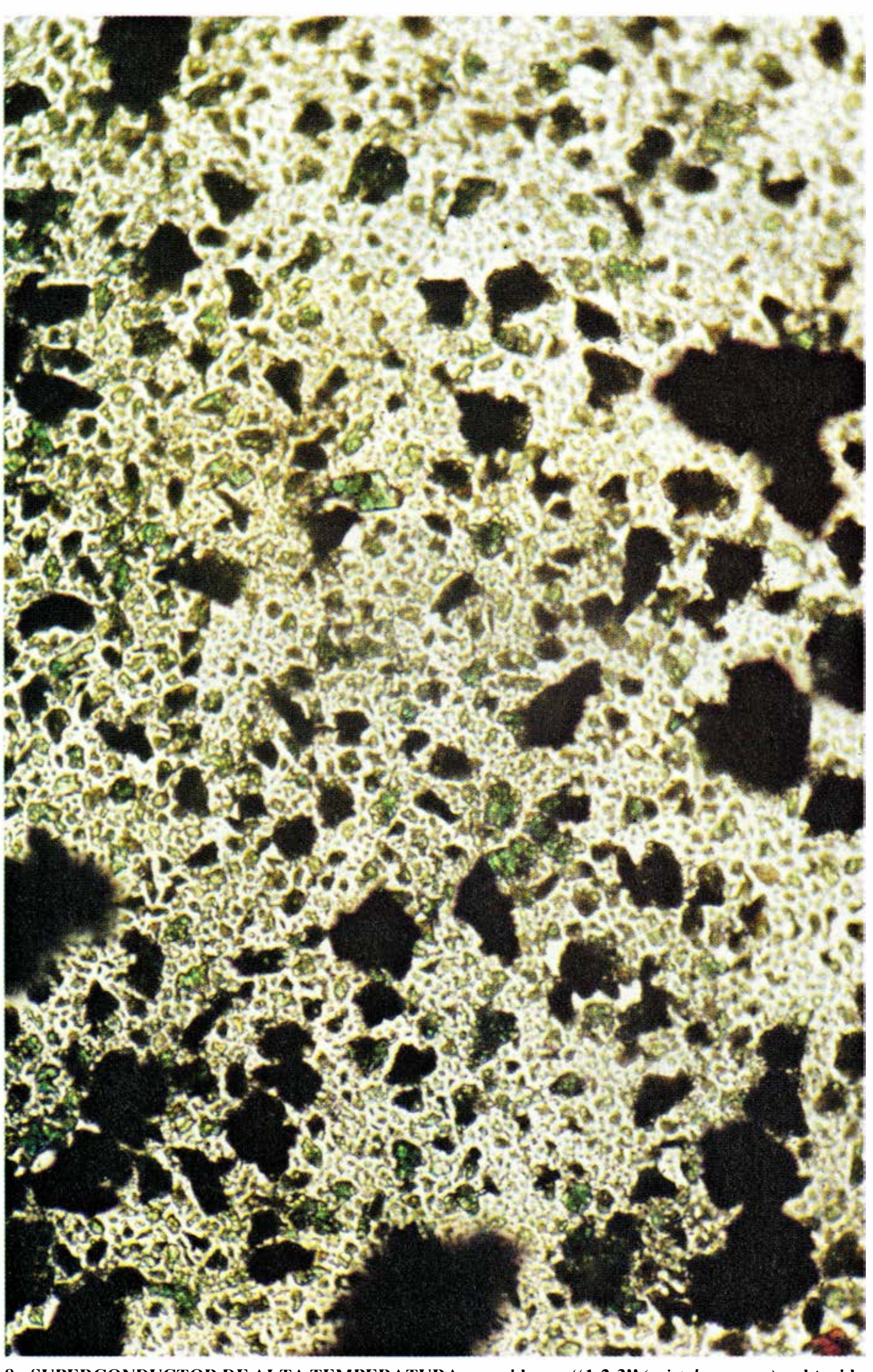
7. DIFRACTOMETRO DE CUATRO CIRCULOS que puede suministrar información sobre la estructura de un cristal microscópicamente pequeño. La muestra se coloca en la orientación deseada mediante dos "arcos" motorizados que se mueven en un círculo (*parte interior del gran toro plateado y el pivote central*) y con un tercer arco que gira el conjunto entero del toro. Un cuarto arco (*el brazo que se extiende a la izquierda*) alberga un detector de rayos X para medir las posiciones e intensidades de los rayos X difractados. Este dispositivo ayudó al autor del artículo y a sus colegas a demostrar que uno de los nuevos superconductores de alta temperatura —óxido de itrio, bario y cobre o "1-2-3"— era, en realidad, una perovskita modificada.

Superconductores: ricos en defectos

En ninguna perovskita son los efectos eléctricos de las variaciones estruc-

turales tan llamativos como en las más recientes: los superconductores de alta temperatura. Mi aproximación a estos materiales comenzó a raíz de una consulta de Ching-Wu (Paul) Chu, de la Universidad de Houston, en febrero de 1987. Chu y sus colaboradores, de Houston y de la Universidad de Alabama en Huntsville, habían demostrado, sin dejar lugar a dudas, que una sustancia que habían desarrollado era superconductora a una temperatura que rompía todos los récords, 93 K. Habían formado el material calentando en un horno una mezcla finamente molida de óxidos de itrio y cobre, junto con carbonato de bario, y conocían las proporciones de los elementos en la mezcla inicial.

Pero tenían un problema. La muestra superconductora que salía del horno era una mezcla de dos fases, o compuestos químicos distintos. Un microscopio óptico de gran potencia reveló que la fase dominante, que vendría a representar los dos tercios del material, de un intenso color verde esmeralda, era transparente; parecía cristalizada con aristas redondeadas. La otra fase era negra, opaca, de forma más regular y de aristas vivas; se sospechaba que era el superconductor, ya que todos los conductores conocidos son opacos. El problema estribaba en que las dos fases se hallaban enteramente entretejidas y resultaba imposible separarlas para analizar su composición mediante las técnicas habituales. Chu necesitaba conocer la composición de la fase superconductora antes de intentar fabricar una forma pura o producir variantes químicas que podrían ser superconductoras a temperaturas aún mayores.



8. SUPERCONDUCTOR DE ALTA TEMPERATURA conocido por "1-2-3" (*cristales negros*) y obtenido originalmente junto con una sustancia extraña (*cristales verdes*). En 1987, a petición del descubridor del material, Ching-Wu (Paul) Chu, de la Universidad de Houston, el autor y sus colegas comenzaron el laborioso proceso de intentar separar las dos sustancias e identificar su composición y estructura química.

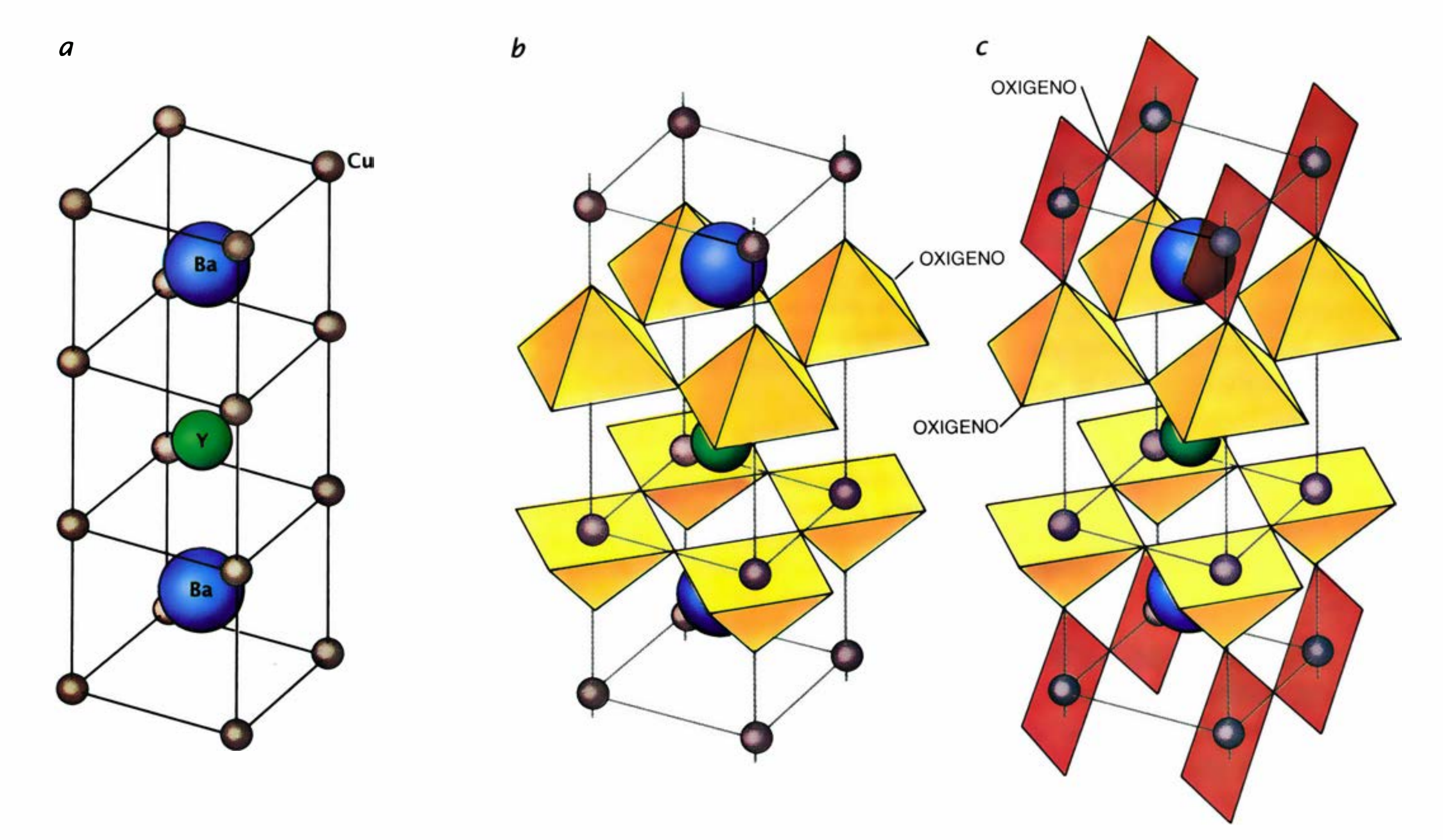
En el laboratorio geofísico solemos analizar rocas, naturales o sintéticas, "sucias", es decir, de fases mezcladas. Además, no estábamos empeñados en la búsqueda de superconductores; no constituíamos, pues, ninguna amenaza contra el derecho de primacía de Chu. Nuestro laboratorio era el lugar ideal para que Chu acudiera en busca de ayuda. Mi equipo contaba con varios cristalógrafos (Ross J. Angel, Larry W. Finger, Charles T. Prewitt y Nancy L. Ross), un geofísico (David Ho-Kwang Mao, con quien Chu se había puesto en contacto al principio) y un químico analista (Chris G. Hadidiacos).

Procedimos como si se tratara de una roca de grano fino. Nos aprestamos a determinar la naturaleza de los elementos en cada fase mediante una microsonda de electrones, un dispositivo que focaliza un intenso haz de electrones sobre una muestra diminuta. Los electrones energéticos excitan los átomos de la muestra y hacen que cada elemento emita rayos X de una frecuencia característica. Las fracciones de los distintos elementos se determinan midiendo la proporción de rayos X que se emite para cada frecuencia.

Elementos de las dos fases

Aunque el tamaño de grano del superconductor de Chu era muy pequeño, quizá demasiado para nuestro instrumento, logramos deducir la razón de los elementos de las dos fases. La mayoría de los granos más finos —presumiblemente la parte verde— incluían iones de itrio, bario y cobre en proporciones de 2:1:1, respectivamente. La importante fase negra era más rica en cobre y los metales estaban presentes en una relación de 1:2:3, lo que explica el apodo "1-2-3" del superconductor.

Nuestra duda principal, en la composición de la fase negra, era el número exacto de átomos de oxígeno, pues la microsonda de electrones no podía decirnos nada sobre ese elemento. A pesar de todo, obtuvimos una estimación



9. ESTRUCTURA DE PEROVSKITA 1-2-3, que se determinó en etapas. Los primeros estudios mostraron que la celdilla unitaria del superconductor, o unidad más pequeña que se repite, constaba de tres cubos (*a*). El cobre (Cu) ocupaba los sitios *B*; el bario (Ba) se alojaba en los sitios *A* en los cubos exteriores, y el itrio (Y) ocupaba el sitio *A* del cubo central. Pero, ¿dónde estaban los oxígenos? Un trabajo posterior mostró que el 1-2-3 poseía dos variantes principales; en ambas faltaba oxígeno en las aristas verticales del cubo de itrio, pero la que era más pobre en oxígeno, $YBa_2Cu_3O_6$ (*b*), carecía también de oxígeno en los planos horizontales de la parte superior e inferior de la celdilla unidad. Los átomos de cobre de esos planos están en coordinación lineal: cada uno se halla íntimamente ligado a un oxígeno por encima y por debajo. El otro tipo, $YBa_2Cu_3O_7$ (*c*), es un superconductor de mejores características. Dos átomos de oxígeno están en el plano superior e inferior, de manera que los átomos de cobre de esos planos caen en el centro de cuadrados formados por cuatro átomos de oxígeno.

adecuada merced a una ley natural, bien aceptada, que sostiene que las cargas positivas y negativas de un cristal han de quedar equilibradas. Sabíamos que las cargas de los iones de itrio y bario eran de +3 y +2, respectivamente, que los iones de cobre podían tener una carga de +1, +2 o +3 y que los tres tipos de cobre podían hallarse en un compuesto. Una simple operación aritmética indicaba entonces que el material negro tenía una carga positiva total de 10 a 16. Siendo -2 la carga de un ion de oxígeno, sabíamos que tenía que haber de cinco a ocho átomos de oxígeno por cada seis iones metálicos. Nos decidimos por un contenido de oxígeno de 6,5, porque en la mayoría de los compuestos el cobre se encuentra en el estado +2. Así, pues, la fórmula química aproximada de la fase negra era $YBa_2Cu_3O_{6,5}$.

El análisis por difracción de rayos X nos permitió conocer muy pronto algo sobre la disposición tridimensional de los átomos. Cuando los rayos X inciden sobre un cristal, se dispersan en determinadas direcciones con intensidades características; e informan así acerca de la disposición de los átomos constituyentes del cristal. Costó dar con un cristal sencillo de magnitud suficiente para el estudio, porque la muestra estaba dividida en un grano muy fino, pero conseguimos finalmente unas cuantas motas negras que tenían entre 30 y 40 micras de diámetro. Sintiéndonos unos afortunados, pegamos un trozo negro, demasiado pequeño para verse a simple vista, al extremo de una fibra de vidrio muy fina y lo irradiamos con un haz de rayos X.

Los comienzos se hicieron duros. Cuantas motas negras y "simples" probábamos eran combinación de dos o más diminutos cristales entretejidos, lo que entorpecía los análisis de difracción. Tras seguir varias pistas falsas, logramos determinar que el material en cuestión tenía una disposición atómica en forma de cubos, que estaban separados a intervalos de unos 3,9 angstrom ($3,9 \times 10^{-8}$ centímetros) a lo largo de cada arista. La disposición era la de una perovskita.

Estábamos contentos y desconcertados: lo primero porque las perovskitas ofrecen estructuras de estudio apasionante; lo segundo porque nunca habíamos encontrado una perovskita con una relación tan baja de átomos de oxígeno por catión. Una perovskita corriente habría tenido nueve oxígenos por cada seis cationes ($A_3B_3O_9$, tres veces ABO_3) y no 6,5 oxígenos. De hecho, la relación más pequeña conocida era de 7,5 oxígenos por cada seis cationes. Nos dimos cuenta de que esta perovskita superconductora iba a tener una estructura anormal con varios oxígenos de menos.

Nuestra siguiente pista para descubrir la disposición de los átomos vino al buscar efectos de difracción de "superestructuras": diagramas de difracción que pueden indicar si la celdilla unidad se compone de uno o más cubos. Aunque todas las perovskitas constan de unidades con forma de cubos, muchas tienen celdillas unitarias integradas por dos o más cubos, cada uno de los cuales posee una composición o una disposición atómica diferente. El diagrama de difracción que desciframos revelaba que la unidad básica que se repetía en el superconductor negro de Chu constaba de tres cubos. Por conveniencia, hablaré de los cubos de la celdilla unitaria como si estuvieran apilados uno encima del otro, aunque podrían estar dispuestos de forma horizontal.

La estructura comenzaba a tomar cuerpo en nuestra mente [*véase la figura 9*]. Supusimos que los átomos, bastante grandes, de itrio y bario ocupaban los sitios *A*, mientras que los

átomos pequeños de cobre ocuparían los sitios *B*. Los efectos de difracción de la superestructura sugerían que el bario, que es mayor que el itrio, estaba en el centro de los cubos superior e inferior y que el itrio se alojaba en el cubo central; estas unidades de tres cubos Ba-Y-Ba se apilarían una encima de otra, a lo largo del cristal. Pero, ¿a quién pertenecían los 6,5 oxígenos y qué lugares normalmente ocupados por el oxígeno estaban libres?

No todo es de la sencillez de 1-2-3

Estudios posteriores de difracción de rayos X revelaron parte de la respuesta, aunque extraída con cuentagotas. Por un lado, la dispersión de rayos X por el oxígeno, que es un átomo ligero, resulta difícil distinguirla en el contexto de diagramas de difracción más intensos producidos por los átomos más pesados de itrio y de bario. Nuestra tarea se complicaba también por la naturaleza del intercrecimiento de nuestros cristales, así como por la presencia de maclas incluso en las muestras menores. No obstante, después de varios días de afanosas mediciones, comenzó a perfilarse un boceto.

Había señales de la presencia de átomos de oxígeno en todos los sitios disponibles en los planos horizontales inmediatamente por encima y por debajo del átomo de itrio (en los límites compartidos con los cubos dotados de bario en el centro). Por el contrario, el oxígeno estaba ausente de las aristas verticales del cubo de itrio. Partiendo de esta premisa, asignamos los restantes oxígenos a las posiciones de los aniones que se hallaban todavía "libres" en los dos cubos de bario, dejando alrededor de la mitad de esas posiciones sin ocupar; en promedio cada celdilla unidad tenía, pues, un total de 6,5 iones completos de oxígeno.

Varias semanas más tarde, investigadores del laboratorio nacional Argonne, recurriendo a la técnica de difracción de neutrones por polvo, determinaron las posiciones específicas de los restantes oxígenos. Demostraron que el superconductor 1-2-3 podía tener hasta siete átomos de oxígeno. Sabemos hoy que el óxido de itrio, bario y cobre incluye a veces seis oxígenos, otras siete y en ocasiones una fracción intermedia. Según parece, las variedades superconductoras son las más ricas en oxígeno.

Además de su notable deficiencia en oxígeno, la perovskita 1-2-3 ofrece otro rasgo anormal: los átomos de oxígeno cercanos a los cationes de bario pueden, con el tiempo, saltar hacia adelante y hacia atrás entre los sitios de los aniones del mismo plano, alterando la estructura del cristal. La presencia de muchos sitios de aniones vacíos permite que el material acepte más átomos de oxígeno cuando aumenta el contenido de oxígeno en el ambiente.

El hallazgo de que los átomos de cobre no estén rodeados por las estructuras octaédricas normales reviste particular interés. La mayoría se muestran en una coordinación cuádruple planar o quíntuple piramidal: se encuentran íntimamente ligados a los cuatro o cinco átomos de oxígeno que les rodean, los cuales forman respectivamente un cuadrado o una pirámide de base cuadrada. En ambas disposiciones, los átomos de cobre permanecen en el mismo plano que el cuadrado. Como los 1-2-3 y otros superconductores de alta temperatura son superconductores en direcciones paralelas a los planos de cobre, bastantes teóricos creen que esta anormal disposición en planos contribuye a las notables propiedades electrónicas de los materiales. Desconocemos, sin embargo, el proceso exacto en que ello ocurre.

A pesar de sus peculiaridades, las perovskitas 1-2-3 comparten muchas características de otras perovskitas no ideales: cationes ordenados, átomos de oxígeno que faltan, estratificación, maclación, numerosos defectos circunscritos y errores en el orden de las capas apiladas. Estas desviaciones subrayan los formidables desafíos que plantean a cuantos intentan analizarlas o desarrollar variedades con propiedades específicas. Como demuestra la historia de los superconductores, las desviaciones que representan un desafío también dan lugar a una oportunidad excepcional para el desarrollo de materiales electrónicos revolucionarios.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PIEZOELECTRIC CERAMICS. Bernard Jaffe, William R. Cook, Jr., y Hans Jaffe. Academic Press, Inc., 1971.

THE CLASSIFICATION OF TILTED OCTAHEDRA IN PEROVSKITES. A. M. Glazer en *Acta Crystallographica*, Sección B, Parte 11, vol. B28, págs. 3384-3392; 15 de noviembre de 1972.

CRYSTAL STRUCTURES: A WORKING APPROACH. Helen D. Megaw. W. B. Saunders Company, 1973.

STRUCTURE AND CRYSTAL CHEMISTRY OF PEROVSKITE-TYPE $MgSiO_3$. Takehiko Yagi, Ho-Kwang Mao y Peter M. Bell en *Physics and Chemistry of Minerals*, vol. 3, núm. 2, págs. 97-110; 28 de agosto de 1978.

THE BREAKTHROUGH: THE RACE FOR THE SUPERCONDUCTOR. Robert M. Hazen. Summit Books, 1988.

Las bacterias, organismos pluricelulares

Forman distintos tipos celulares y constituyen colonias de gran regularidad que parecen estar dirigidas por sistemas de control temporal y espacial sumamente complejos

James A. Shapiro

Sin bacterias resultaría imposible la vida sobre la tierra, al menos en su forma actual. Esos microorganismos desempeñan un papel de importancia capital en muchos procesos geoquímicos, incluidos los ciclos fundamentales del nitrógeno, carbono y azufre, decisivos para la circulación de los elementos básicos de la vida. Si llegaran a detenerse los ciclos, los suelos del planeta, las aguas y la atmósfera se tornarían inhóspitos para cualquier forma de vida. Sin embargo, y a pesar de su importancia global, sigue persistiendo la idea de que las bacterias constituyen simples microbios unicelulares.

Tal enfoque está sometido hoy a revisión. Los científicos están descubriendo que, en muchos aspectos, las células bacterianas se asemejan más a los componentes de los organismos pluricelulares que a los organismos autónomos de vida independiente. Las bacterias forman comunidades complejas, cazan presas en grupo y dejan señales químicas que dirigen el movimiento de millares de individuos.

A comienzos de este siglo los investigadores disponían ya de pruebas de que las bacterias del suelo vivían en comunidad. El holandés Martinus Beijerinck descubrió que la bacteria *Rhizobium* infectaba las raíces de las leguminosas y formaba en ellas estructuras pluricelulares organizadas que funcionaban a modo de fábricas especializadas en la fijación del nitrógeno. Casi al mismo tiempo, trabajando en París, Sergei Winogradsky descubrió el papel de agentes de la degradación de la celulosa que las bacterias desempeñan en el ciclo del carbono. Winogradsky fue también uno de los primeros microbiólogos que observó directamente las bacterias en el suelo; advirtió que muy pocas medraban como células aisladas: la mayoría vivía en asociaciones adheridas a partículas del suelo. Se conocía ese comportamiento gregario en el ámbito del laboratorio, donde las bacterias forman colonias características en las placas de Petri o se adhieren a las paredes de los frascos de cultivo en poblaciones organizadas.

Pese a esas primeras observaciones, ha perdurado la visión de la bacteria como un organismo unicelular. De ello es responsable en buena parte la bacteriología médica. Los organismos patógenos se identifican de ordinario aislando una única célula del agente sospechoso; se obtiene un cultivo a partir de aquel ejemplar y se comprueba que el cultivo puro resultante provoca la enfermedad en cuestión. Por regla general ni siquiera llega a plantearse la posibilidad de que las infecciones del organismo humano se deban a agregados pluricelulares de bacterias.

En efecto, muchas de las teorías sobre el crecimiento de las bacterias, su fisiología y su genética se han formulado en términos relativos exclusivamente a la bacteria aislada. Desde el punto de vista epistemológico no deja de resultar curioso tal acento sobre la célula solitaria pues, en la práctica, en ese campo la mayoría de las investigaciones se realiza en poblaciones celulares. Por ejemplo, puede que en un ensayo enzimático se utilice un extracto de unos cien millones de células, mientras que las conclusiones que se derivan de la prueba suelen considerar implícitamente que todas las bacterias de la población son más o menos idénticas. Tal premisa quizá simplifique la interpretación de los resultados experimentales, pero es probable que en muchos casos carezca de validez. ¿Resulta excepcional, o, por el contrario, algo frecuente, que las bacterias que constituyen una población presenten rasgos propios de la pluricelularidad? He trabajado en dar respuesta a esa pregunta y he llegado a la conclusión de que la vida de la mayoría de las bacterias —si no todas— presenta un marcado carácter pluricelular.

Los ejemplos de pluricelularidad abundan entre las bacterias; más aún, algunos de los complejos procesos bioquímicos que llevan a cabo no podrían realizarse con la misma eficacia si no estuvieran organizadas en grupos. La fotosíntesis ilustra ese punto de varios modos. Las bacterias fotosintéticas, igual que los vegetales, aprovechan la energía solar para convertir el anhídrido carbónico en compuestos orgánicos. Un grupo de bacterias fotosintéticas, el de las cianobacterias, o bacterias verdeazuladas, crece a menudo formando cadenas de células enlazadas o entrecruzadas a modo de tapete; poseen clorofila y se asemejan en muchos aspectos a las algas pluricelulares. De hecho, durante muchos años se ha creído que

JAMES A. SHAPIRO es profesor de microbiología de la Universidad de Chicago. Licenciado en filología inglesa por el Harvard College (1964), disfrutó de una beca Marshall de ampliación de estudios en la Universidad de Cambridge, por la que se doctoró en genética. Pasó un año de becario en el Instituto Pasteur de París, dos cursos como profesor de la Universidad de La Habana y varios meses en la de Tel Aviv; ha intervenido en los programas de intercambio soviético-norteamericanos en el campo de la microbiología, entre 1975 y 1978. En 1973 se incorporó a la Universidad de Chicago. Este artículo es el segundo que publica en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA James A. Shapiro.

las cianobacterias pertenecían al reino vegetal. La organización pluricelular ayuda a la captación de la luz, a la vez que brinda otros beneficios.

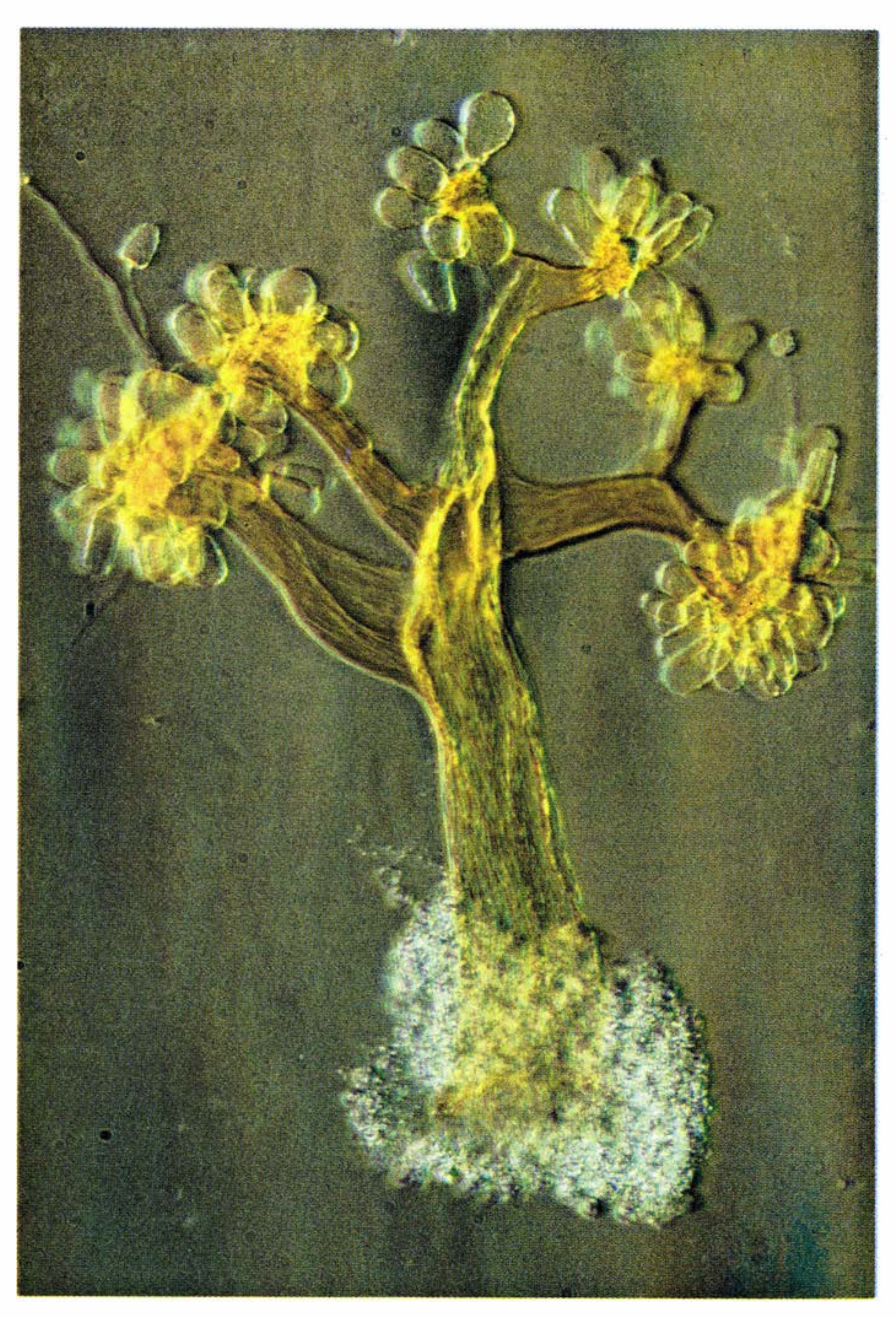
Anabaena, un poblador habitual de las lagunas de agua dulce, es una de las bacterias fotosintéticas que mejor se conoce. Está capacitada para realizar la fotosíntesis y la fijación del nitrógeno, dos procesos bioquímicos incompatibles en el interior de una misma célula: el oxígeno producido durante la fotosíntesis inactiva la nitrogenasa, la enzima necesaria para la fijación del nitrógeno. Cuando abundan los compuestos nitrogenados, *Anabaena* constituye un microorganismo estrictamente fotosintético y todas sus células son idénticas entre sí. Sin embargo, cuando los niveles de nitrógeno son bajos, se producen heterocistes, células especializadas que carecen de clorofila y sintetizan nitrogenasa, una enzima que les confiere la posibilidad de convertir el nitrógeno gaseoso en una forma utilizable.

James Golden y Robert Haselkorn, de la Universidad de Chicago, han demostrado que la polivalencia de *Anabaena* constituye una forma de ingeniería genética controlada. En el curso de la diferenciación de los heterocistes se produce una reorganización específica, en virtud de la cual aparece una secuencia que determina una subunidad de la nitrogenasa. Tal reorganización sólo la sufren las células que se están transformando en heterocistes. En la formación de células especializadas del sistema inmunitario de los vertebrados se producen reorganizaciones del ADN comparables.

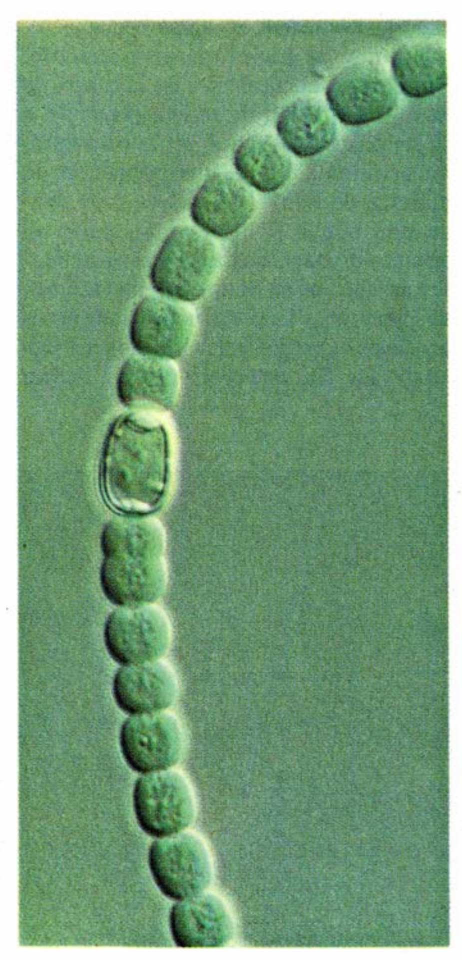
En los filamentos de *Anabaena* existen, además, canales submicroscópicos que ponen en conexión los dos tipos de células. A través de esos canales se transportan los productos celulares (el nitrógeno fijado hacia las células fotosintéticas y los productos fotosintéticos hacia los heterocistes). *Anabaena* se comporta, pues, como un organismo pluricelular, más que como bacteria unicelular: para el desempeño de procesos químicos especializados e incompatibles entre sí se sirve de la división del trabajo entre sus células.

Las Mixobacterias, las bacterias de morfología más compleja, ofrecen ejemplos de comportamientos pluricelulares más espectaculares aún. Sus elaborados cuerpos fructíferos rivalizan con los de mohos y hongos mucosos y durante largo tiempo han sido objeto de curiosidad científica. Las Mixobacterias son organismos sociales por excelencia; sus fascinantes y casi psicodélicos patrones de agregación y de movimiento han sido filmados en una fascinante serie de fotogramas producida por Hans Reichenbach, de la Sociedad para la Investigación en Biotecnología, de Braunschweig, y sus colaboradores del Instituto de Cine Científico de Gotinga.

A diferencia de lo que ocurre con muchas bacterias, que periódicamente atraviesan una etapa de letargo como esporas solitarias, muchas Mixobacterias nunca se presentan aisladamente. Por el contrario, entran en la etapa de letargo en forma de quiste (vesícula o ciste) pluricelular, que tarde o temprano germina y libera una población de millares de individuos. Cada ciste funda una nueva población; al crecer el número de bacterias, con el consiguiente aumento de su densidad en el medio, se producen una serie de complejos procesos, característicos de la pluricelularidad. Se segregan rastros de un



1. CUERPO FRUCTIFERO PLURICELULAR de *Chondromyces crocatus*, una especie del grupo Myxobacteriae, reproducido aquí a 268 aumentos. La estructura consta de un tallo central que se ramifica y forma racimos de esporas monocelulares; al estallar, las esporas se dispersan y originan nuevas colonias. La micrografía es obra de Hans Reichenbach, de la Sociedad de Investigaciones Biotecnológicas de Braunschweig.



2. ***ANABAENA*****, una cianobacteria fotosintética, forma filamentos de células en lagunas de agua dulce. La mayoría de las células son fotosintéticas, pero cuando los niveles de nitrógeno caen, se desarrollan heterocistes. Capaces de llevar a cabo la fijación de nitrógeno pero no la fotosíntesis, los heterocistes son mayores que las células fotosintéticas y contienen gránulos donde se almacenan compuestos ricos en nitrógeno. La micrografía, tomada con óptica de Nomarski, presenta esas células a 1625 aumentos.**

material mucoso extracelular, que vienen a convertirse en grandes avenidas por donde avanzan, dirigidas, miles de células; en el conjunto de la población se dejan sentir ondas pulsátiles rítmicas; se alejan o se acercan al centro o los bordes de la colonia en crecimiento oleadas de bacterias que forman agregados en puntos específicos de la colonia para construir cistes o, en algunas especies, complejos cuerpos fructíferos. El movimiento es muy coordinado: cuando la población emigra sobre el agar, avanza formando una unidad indivisa. Si alguna célula se aleja unos micrometros de los bordes, retorna rápidamente al sitio de partida, como atraída por un filamento elástico.

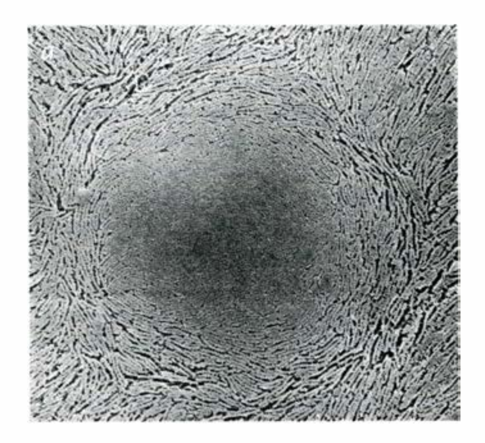
Incluso las especies de Mixobacterias que entran en letargo como esporas unicelulares exhiben hábitos sociales durante buena parte de su ciclo vital. Así, cuando dos células de *Mixococcus virescens* se encuentran, inician una danza ritual característica: se sitúan una junto a otra y empiezan a moverse en la misma dirección, o se frotan mutuamente para separarse luego. Tras la división, las células hijas se comportan de manera semejante. Literalmente, las bacterias siguen manteniéndose en estrecho contacto.

Igual que en el mundo de los organismos superiores, en el de los microbios se producen relaciones de depredador y presa. Algunas especies depredadoras de Mixobacterias se alimentan segregando enzimas que disuelven la cubierta celular externa de otros microorganismos; cuando las células estallan, las Mixobacterias absorben el contenido. En respuesta a su entorno acuático, la especie *Mixococcus xanthus* ha desarrollado un método específico de captura de la presa. Si segregara las enzimas directamente en el agua, se diluirían, lo mismo que los nutrientes de su presa. Jeffrey C. Burnham y sus colaboradores, de la Facultad de Medicina de Ohio, han descubierto que *M. xanthus* se organiza en colonias esféricas formadas por millones de bacterias. Las colonias rodean los organismos que constituyen la presa propicia y los atrapan en bolsas de la superficie de la esfera, donde quedan eficazmente retenidos tanto el contenido de la presa como las enzimas digestivas.

A lo largo de la última década, A. Dale Kaiser y sus colaboradores, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, han venido estudiando las bases genéticas del sistema de comunicaciones y de movimientos de *M. xanthus*. En la búsqueda de mutantes que hubieran perdido la capacidad de diseminarse o de formar cuerpos fructíferos, identificaron regiones específicas del ADN del organismo que controlan la agregación, la motilidad y la diferenciación. Descubrieron que, en *M. xanthus*, el control de la motilidad corre a cargo de dos sistemas. El sistema *A* (por aventurado) capacita a las células individuales para moverse por el sustrato; el sistema *S* (por social) controla el movimiento de grupos de células. Si uno de los dos sistemas falla, las células pueden todavía diseminarse, si bien lo hacen de manera anormal. Pero si fallan ambos, no pueden. Los dos sistemas son extraordinariamente complejos y su funcionamiento correcto precisa de un gran volumen de información genética específica. Si una mutación afecta a uno cualquiera de sus 23 *loci*, se pierde la motilidad debida al sistema *A*; al menos otros 10 *loci* controlan el sistema *S*.

Kaiser y sus colaboradores comenzaron también a descifrar algunos de los mecanismos en cuya virtud las células de *M. xanthus* se comunican entre sí. Recurrieron a mutantes que carecían de un mismo carácter, pero en los que el defecto era el resultado de mutaciones que afectaban a *loci* distintos. Descubrieron que, cuando en una misma placa de Petri se reunían dos mutantes con trastornos de la motilidad, la recuperaban cuando ambos mutantes permanecían juntos. De manera semejante, si dos mutantes con defectos en la esporulación se mezclaban en el mismo cultivo, producían cuerpos fructíferos y esporulaban. Según se sabe ahora, en algunos casos esa complementación de las células mezcladas estaba mediada por la producción de sustancias extracelulares; en otros casos quizá sea resultado del contacto directo entre células o de la presencia de dos tipos de células complementarias.

Mis estudios sobre el comportamiento de las bacterias se iniciaron, como a menudo suele ser el caso, tras una observación fortuita. Hará unos cinco años me encontraba ensayando con una herramienta de ingeniería genética, diseñada por Malcolm J. Casdaban y sus alumnos de la Universidad de Chicago, para estudiar la expresión enzimática en *Pseudomonas*. La técnica me permitió unir los genes de ciertas enzimas de *Pseudomonas putida* con la secuencia de ADN de *Escherichia coli* que codifica la enzima beta-galactosidasa. El atractivo de ésta como herramienta de ingeniería genética radica en que, ante su presencia, ciertas sutancias cambian de color. Si

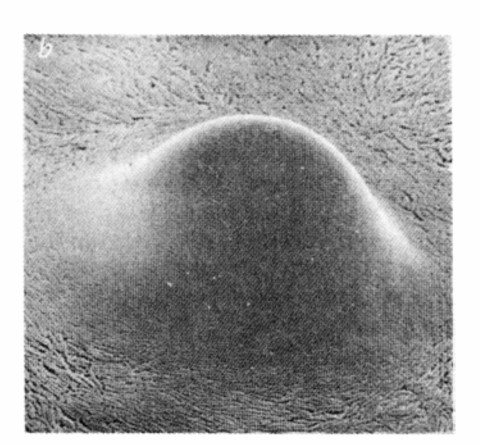


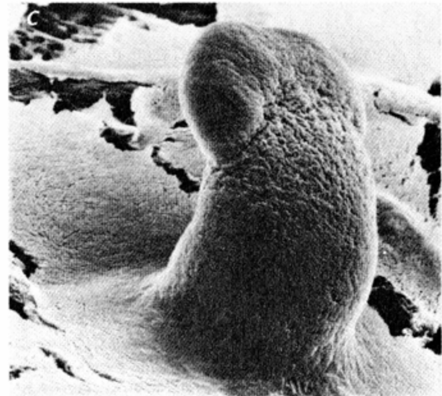
3. FORMACION DEL CUERPO FRUCTIFERO en las mixobacterias, las bacterias de morfología más compleja y organismos sociales por excelencia. El proceso sigue una secuencia característica, como

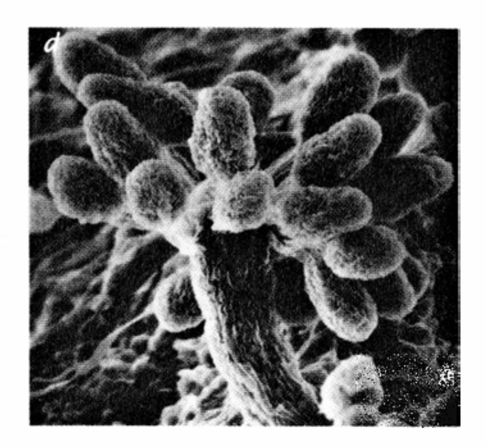
4. ESFERAS DEPREDADORAS formadas por millones de células de *Myxococcus xanthus*; el microorganismo se vale de esa estructura para capturar alimento. La microscópica presa, como la bacteria *Phormidium luridum* (*recuadro*), queda adherida a la colonia, que en último extremo la digiere en el interior de bolsillos dispuestos por la superficie. Las micrografías, tomadas a 440 aumentos, son de Jeffrey C. Burnham, Susan A. Collart y Barbara W. Highison.

se une la secuencia de la beta-galactosidasa al gen de la enzima objeto de estudio y el ADN recombinante se inserta en *Pseudomonas*, cuando se cultiva la bacteria en agar que contiene esas sustancias, la cantidad y distribución del color constituye una medida directa de la expresión del gen.

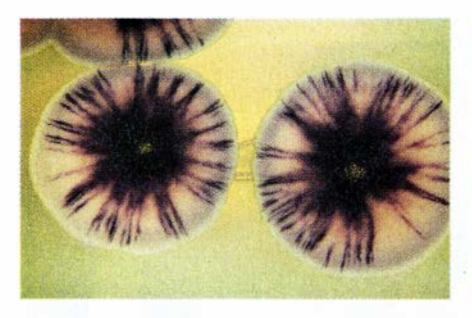
Para mi sorpresa, cuando sembré las cepas recombinantes de *P. putida* en placas de agar que contenían ese indicador, todas las colonias desarrollaron un mismo patrón de tinción, de aspecto floral. Repetí el experimento con *E. coli* transformada por ingeniería genética y con cepas de bacterias de pigmentación natural, como *Pseudomonas cepacia*, *Serratia marcescens* y *Chromobacterium violaceum*. Todas producían colonias con un patrón característico. Esa exclusividad de los patrones en función de las cepas y especies (incluidas las dotadas de pigmentación natural y no sometidas a manipulación ge-

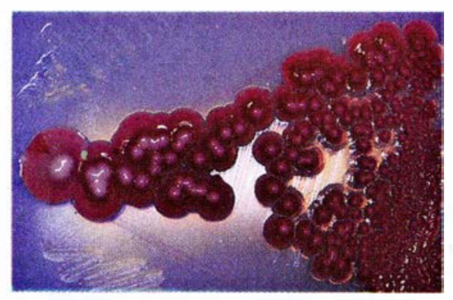




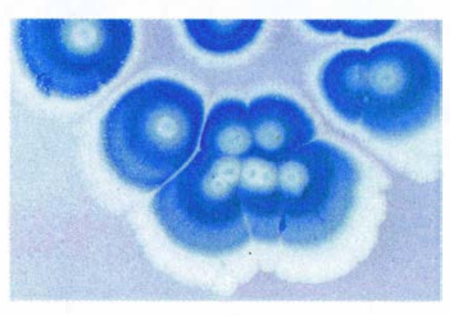


se pone de manifiesto en esta serie de electromicrografías de barrido que captan la morfogénesis de *Stigmatella aurantiaca*. En primer lugar, las células forman centros de agregación. A medida que los centros acumulan bacterias, aparece un promontorio que se desarrolla y se convertirá en un tallo. En algunas especies, como ésta sin identificar procedente de la Universidad de Indiana, las ramificaciones alcanzan gran riqueza y complejidad. El cuerpo fructífero de S. *aurantiaca* está tomado a 450 aumentos. Las micrografías son obra de Gabriela M. Vasquez, Frank Qualls y David White, todos de la Universidad de Indiana.

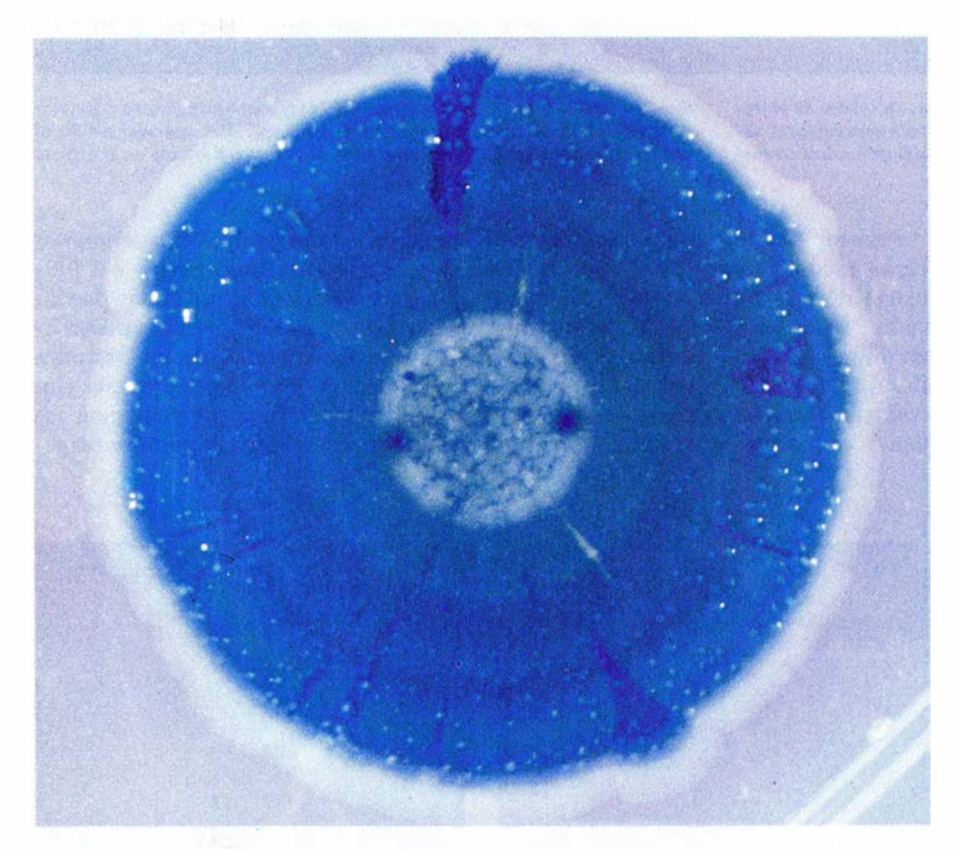








5. COLONIAS DE ASPECTO FLORIDO, que se obtienen sembrando bacterias sobre placas de agar. Cada colonia (si no es muy densa) adopta un patrón característico de la cepa. *Chromobacterium violaceum* (*arriba, a la izquierda*) produce el pigmento violaceína y da colonias de color violeta. *Serratia marcescens* (*arriba, a la derecha*) es de color amarillo y posee una textura superficial característica, resultado de la agregación celular en la cubierta. Abajo, a la derecha, una colonia de *Escherichia coli* en la que se han introducido por ingeniería genética secuencias de ADN que codifican la enzima beta-galactodidasa; donde se expresa esa enzima, la colonia se torna azul. Las muestras no aparecen representadas todas a la misma escala.



6. COLONIA DE *E. COLI* obtenida a partir de una sola gota de cultivo que contenía millares de células. El complicado patrón de los anillos pigmentados constituye, junto con su extraordinaria regularidad, una de las características de ciertas colonias de *E. coli* modificadas por ingeniería genética y en las que la tinción revela la actividad de la enzima beta-galactosidasa. Se aprecian también algunos sectores en los que se ha producido un cambio en el control de la síntesis de la enzima. Los sectores situados a la cinco y a las diez del reloj exhiben bordes curvos, señal de que las bacterias de esas regiones se reproducen antes que las del resto de la colonia. Los anillos concéntricos situados en la zona de las diez del reloj aparecen desplazados hacia afuera, lo que denota que los cambios de actividad enzimática tuvieron lugar simultáneamente dentro y fuera del sector. La colonia reproducida aquí medía aproximadamente un centímetro de diámetro.

nética) me indujo a considerar el crecimiento colonial de las bacterias como un proceso extraordinariamente regulado y sometido a control temporal. Estudios posteriores confirmaron esa hipótesis. No me cabe ya duda de que la organización de la colonia sigue ciertas reglas de carácter general, que ayudan a explicar la existencia de pautas generales.

Las colonias tienden a adoptar una configuración circular, que crece por adición de células a su perímetro. Al extenderse la colonia sobre el agar, se observa que, en ese crecimiento, participan elementos concéntricos y elementos radiales. Los concéntricos son anillos que van encerrando la colonia; los radiales, o sectores, tienen el aspecto de tajadas de pastel. Todos los sectores los va formando, por propagación centrífuga, la progenie de un antepasado común. Algunos sectores crecen bien y se expanden, mientras que otros apenas logran seguir existiendo o incluso desaparecen cuando la colonia aumenta de tamaño.

En muchos casos resulta posible seleccionar células de distintos sectores, cultivarlas y demostrar que las que proceden de una porción poseen rasgos que difieren de las derivadas de otras; a menudo, las células de los diferentes sectores se distinguen por las diferencias observables en su ADN. No hace mucho, en un trabajo conjunto con N. Patrick Higgins, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Alabama, descubrimos que, en ocasiones, las diferencias existentes entre el ADN obtenido de distintos sectores puede visualizarse directamente recogiendo las colonias sobre papel de filtro, extrayendo su ADN *in situ* y aplicando sondas radiactivas para detectar determinadas secuencias.

Poseemos menos información sobre los elementos concéntricos y, por tanto, nos resultan más enigmáticos. Las células de una zona concéntrica, o anillo, comparten alguna propiedad (como el nivel de expresión de la actividad de la beta-galactosidasa) pero no están emparantadas por vía de un antepasado común; guardan parentesco directo con las bacterias de las zonas precedentes y siguientes, pero no entre sí. Si la organización de la colonia en zonas distintas no puede explicarse por herencia, ¿cómo dar razón de ella? Algún sistema debe conferir propiedades comunes a las bacterias situadas en el mismo anillo, que las distingue de las de otros anillos.

La diversidad del modo de interacción entre elementos concéntricos y sectoriales ofrece una serie de indicios sobre el origen de los patrones concéntricos. Las fotografías de las colonias muestran que con frecuencia se conservan los anillos concéntricos en sectores que crecen más deprisa que el resto. Ello provoca la aparición de anillos abombados hacia el exterior. El estiramiento pone de manifiesto que los anillos no se forman en lugares específicos de la placa de agar (es decir, a cierta distancia del centro), sino en un momento determinado del curso del desarrollo de la colonia. Lo cual sugiere que las bacterias poseen relojes biológicos que les capacitan para programar la diferenciación celular en momentos específicos del desarrollo. Las pulsaciones rítmicas del crecimiento de las colonias de mixobacterias reflejan también la actuación de un mecanismo que conlleva la existencia de algún tipo de reloj biológico. Tanto los relojes biológicos como el control temporal del desarrollo, algo hasta ahora desconocido en el mundo de las bacterias, son rasgos importantes de los organismos superiores.

El examen de la textura de la superficie de las colonias indica que la diferenciación celular se produce también en el nivel de la agregación celular. Cuando se provoca la reflexión de la luz sobre la superficie de una colonia, se observan patrones de pigmentación bastante organizados, en los que se distinguen elementos radiales y concéntricos. En muchos casos, ambos patrones coinciden: un sector definido por el color puede exhibir, asimismo, cierta estructura particular de superficie y un anillo puede resaltar tanto por su color como por su topografía.

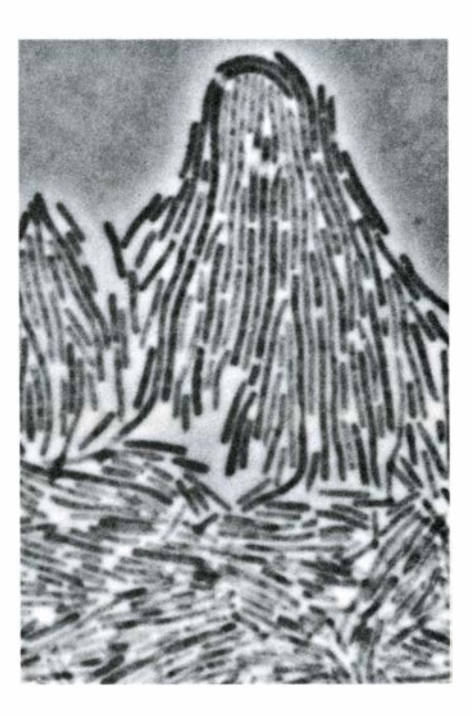


7. MICROGRAFIA ELECTRONICA DE BARRIDO de una colonia de *Pseudomonas putida* en la que se distingue un material extracelular envolvente segregado por los microorganismos. Esta supraestructura puede, en algunos casos, facilitar la comunicación entre las células de la colonia. Se advierte también que una célula alargada conecta ambos bordes de la hendidura; este tipo de células podría estar implicado en las comunicaciones intercelulares en el interior de la colonia. El aumento de la imagen es de 2300 diámetros.

Está claro, pues, que la organización de la colonia conlleva algo más que una simple distribución de células en función de sus diferencias bioquímicas. Con el objeto de estudiar los patrones estructurales de una manera más precisa, recurrí a la microscopía electrónica de barrido, técnica que permite la visualización de las superficies a gran aumento y con gran profundidad de campo. La microscopía de barrido puso de manifiesto que las colonias de *P. putida* y de *E. coli* están constituidas por células muy diferenciadas, que a menudo dan lugar a formaciones pluricelulares características que coinciden con la organización macroscópica de la colonia. También ha revelado que las colonias segregan materiales extracelulares, algunos de los cuales forman una especie de envoltura o de armazón sobre su superficie.

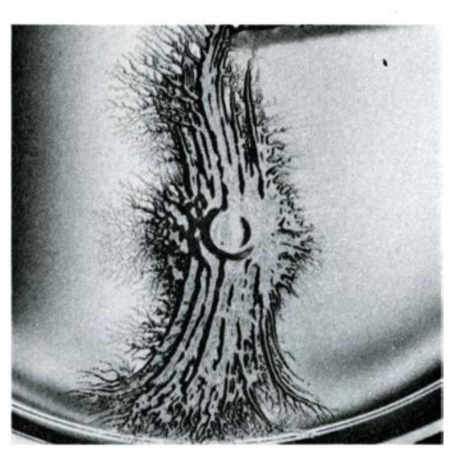
De esos estudios se desprendía que la actividad bioquímica en el seno de una colonia bacteriana se encontraba muy organizada y sometida a restricción espacial: las células alojadas en regiones distintas de la colonia mostraban formas y propiedades bioquímicas distintas. Para identificar los factores desconocidos que controlan el crecimiento pluricelular de las bacterias, comencé a estudiar colonias con aspecto de enjambre, que crecen con gran rapidez y en poco tiempo cubren una gran superficie, dos carateristicas que las hacen ideales para la experimentación biológica.

Este comportamiento gregario puede observarse en muchas especies de bacterias, de instalación taxonómica bastante alejada. Me centré en la especie *Proteus mirabilis*. Como el dios griego Proteo, esta bacteria adopta formas diferentes y crea llamativas configuraciones sobre la placa de Petri. Destacan dos rasgos fundamentales. Uno



8. CELULAS GREGARIAS ALARGADAS del borde de una colonia de *Proteus mirabilis*. Se preparan para avanzar en grupo sobre la superficie del agar, lo que consiguen rotando sincrónicamente sus flagelos. La micrografía, de 600 aumentos, es de S. A. Sturdza, del Instituto Cantacuzino de Bucarest.



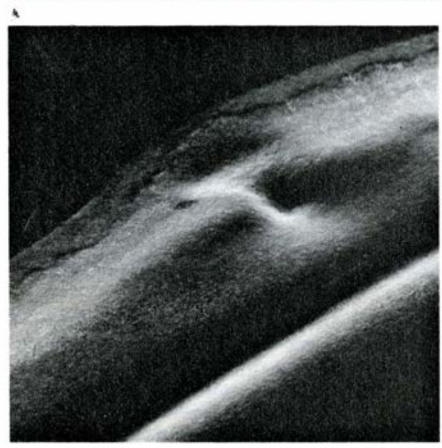


9. MUTANTES DE *PROTEUS MIRABILIS*. Revelan, a través de la admirable geometría de sus colonias, algunas claves sobre el control espacial y temporal de su extensión. Uno de los mutantes (*izquierda*) genera estructuras repetitivas en forma de meseta cuando crece en una placa de Petri. Si se practica un surco en la superficie del agar, la extensión de la colonia se detiene al cabo de unos pocos ciclos. Que el carácter gregario se bloquee en la zona ensombrecida por la grieta indica que, del centro, sale alguna señal química. La morfogénesis parece estar sometida, por tanto, al control del conjunto de la colonia, y no regulada exclusivamente por el borde migratorio. Otro de los mutantes (*derecha*) ha perdido su simetría circular y presenta un patrón distinto. La bacteria comienza formando gruesas columnas a lo largo de las líneas de tensión del agar; posteriormente, esas columnas crecen hasta alcanzar cierto tamaño y dan lugar a ramificaciones menores. Tal patrón sugiere que, aunque el mutante carecía de la capacidad de producir colonias circulares, seguía manteniendo algún tipo de control direccional. La colonia medía unos cuatro centímetros de longitud.

es la existencia de al menos dos tipos de células muy diferentes en una colonia: células alargadas, formadoras de enjambre, cubiertas por centenares de flagelos, y otras cortas, no formadoras de panal, con muy escasos flagelos. El segundo rasgo tiene que ver con el desarrollo de la colonia, que se ajusta a un proceso rítmico perfectamente programado.

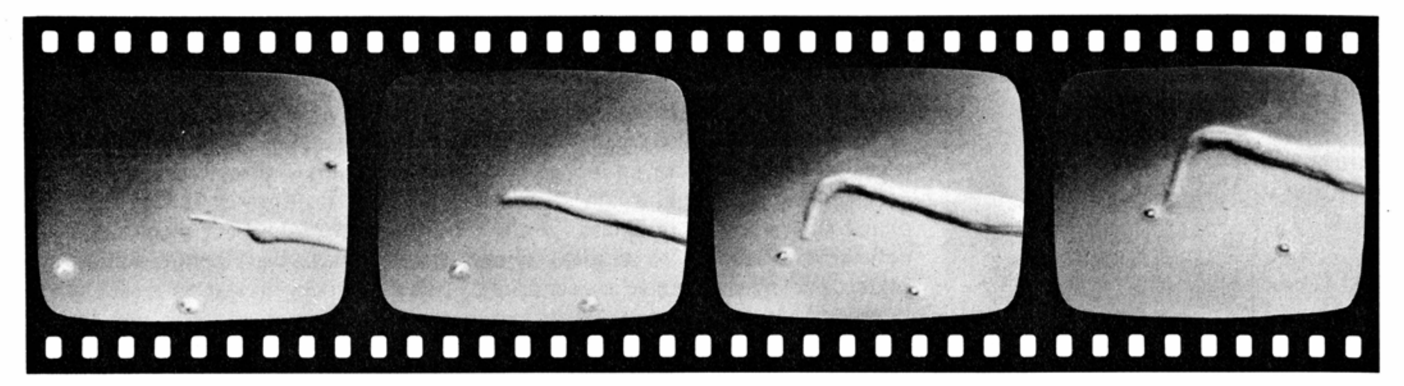
Las colonias en enjambre se desarrollan a partir de una población inicial de células cortas no gregarias. A medida que las células cortas se dividen, comienzan a aparecer las alargadas y formadoras de enjambre, que emigran hacia la periferia de la colonia, donde se reúnen en grupos e inician la expansión de la colonia por medio de una serie de movimientos arremolinados. Los flagelos que cubren la superficie de las células gregarias rotan y, al hacerlo, impulsan las células. (Se entiende fácilmente que el movimiento de los flagelos impulse los movimientos celulares en el interior de un líquido; sin embargo, resulta difícil, y en realidad sigue constituyendo un misterio, cómo esas delicadas estructuras logran impulsar las bacterias sobre una superficie tan viscosa como la del agar.) Al observar las colonias en enjambre con el microscopio se distinguen millares de flagelos, dispuestos sobre algunas docenas de células gregarias, que se mueven sincrónicamente y producen ondas oscilatorias a medida que las células se van propagando hacia la periferia. Tan extraordinaria coordinación fascinó de tal modo a Alexander Fleming, el descubridor de la penicilina, que llegó a preguntarse si no tendría *Proteus* un sistema nervioso...

Filmando con una cámara de vídeo la morfogénesis de *Proteus* he podido identificar una clara periodicidad en el crecimiento de la colonia, confirmándose así los hallazgos de otros investigadores. He descubierto, en las colonias en enjambre, una intensa actividad, y ello no sólo en los bordes de





10. MORFOLOGIA CARTACTERISTICA de las células en distintas zonas de la colonia; se pone de manifiesto en una serie de micrografías de una colonia de *E. coli* tomadas con un microscopio electrónico de barrido. La colonia de 68 horas (*arriba*), obtenida a partir de una población inicial de 100.000 células, presentaba un diámetro de cinco milímetros. Al observar el borde en crecimiento a 100 aumentos (*abajo, a la izquierda*), se distingue una frontera clara entre dos grupos de células. A mayor aumento (750) (*abajo, a la derecha*), se aprecia que la zona más externa está constituida por macrocélulas dispuestas irregularmente, mientras que la interna contiene células menores, más o menos paralelas.



11. MOVIMIENTO INTENCIONADO de las células de *M. xanthus*, revelado en esta serie de imágenes tomadas de un monitor de vídeo. En la parte inferior de la pantalla se ve un pequeña esfera de látex, de cinco micrometros; hacia allí orientarán las células su movimiento. Unos 18 minutos después (*segunda imagen*), la punta de la flecha que forma el conjunto de esas células gira hacia la esférula de látex; a los 33 minutos (*cuarta imagen*) ya la ha alcanzado. Después de comprobar que no es comestible, reemprenderá la marcha en busca de alguna presa. Fotografías de Martin Dworkin, de la Universidad de Minnesota.

avance, donde las células gregarias se mueven rápidamente hacia el exterior, sino también más al interior, donde persisten las divisiones celulares (incluso cuando las células formadoras de enjambre han dejado de avanzar). Las células gregarias no siguen propagándose indefinidamente; se detienen tras recorrer cierta distancia, para reanudar la marcha al cabo de un tiempo, que puede durar hasta varias horas, en función de la temperatura y la composición del agar u otras condiciones. El gregarismo es una actividad estrictamente pluricelular; cualquier célula que se separe del resto es incapaz de avanzar por el agar, a no ser que quede abrazada por otro grupo de células gregarias, momento en que empezará a moverse.

La actividad desarrollada en el interior de los límites de la colonia sigue un ritmo y periodicidad propios, aunque siempre guarda relación con la expansión global de la colonia. Por ejemplo, cuando las células gregarias han terminado una fase de expansión, grupos de células más densamente agregadas se mueven, en oleadas, desde el interior del enjambre hacia la zona periférica. Se apelmaza entonces la masa celular en la zona recién colonizada y se produce un burbujeo en la superficie encerrada en el perímetro de la colonia. Estos y otros procesos postmigratorios, acompañados por una maravillosa coreografía, crean texturas muy elaboradas, con aspecto de mesetas, sobre la superficie de esas colonias plenamente desarrolladas.

Tras observar el proceso de formación del enjambre me planteé la posibilidad de conocer los sistemas que controlan ese comportamiento, regular y complejo a la vez. En la investigación biológica, la observación de la respuesta de los organismos ante circunstancias poco comunes suele brindar datos de gran importancia. ¿Se alterará el comportamiento gregario de esas colonias modificando algún parámetro del cultivo?

Dos tipos de pruebas sugieren que, en efecto, el comportamiento gregario está regulado. Uno se refiere a lo que ocurre cuando se obstaculiza, por medios físicos o químicos, la formación del enjambre o se bloquea el crecimiento de la masa celular. En ambos casos se producen respuestas morfológicas específicas. La observación de las colonias en enjambre tras haberlas manipulado artificialmente (o después de accidentes espontáneos que deforman los límites regulares de las colonias) pone de manifiesto la existencia de controles temporales y direccionales que influyen sobre su crecimiento. En particular, parece que en la conducción del crecimiento y expansión de la colonia intervienen de manera destacada sustancias químicas que se difunden por el agar.

El segundo tipo de datos hace referencia a la morfogénesis, que está sujeta a un control hereditario. En primer lugar, todas las cepas de *P. mirabilis* aisladas de la naturaleza presentan un modo característico de desarrollo de la colonia en enjambre. En segundo lugar, a partir de esas cepas naturales pueden obtenerse varios mutantes que, si bien conservan la capacidad de extenderse, lo hacen con geometrías diferentes de las que adoptan sus progenitores. Algunos mutantes forman mesetas periódicas, más apretadas que los enjambres creados por sus progenitores; otros no forman meseta ninguna. Un mutante especialmente llamativo ha perdido su simetría circular y crece según un patrón ramificado en el que influyen las líneas de tensión del agar. Está claro que en esos mutantes se ha producido una alteración de los genes que regulan la morfogénesis, sin que haya quedado eliminada su capacidad de crear enjambres. Desconocemos el mecanismo bioquímico del que se sirven los sistemas que controlan la morfogénesis en *Proteus* (o, en lo que se refiere a ese punto, en *Mixococcus* o *E. coli*). Sin embargo, dada la especificidad de los fenómenos del desarrollo, el estudio de tales sistemas nos permitiría desentrañar el comportamiento de múltiples bacterias y su modo de coordinación, tanto espacial como temporal.

En los dos últimos decenios, al dedicar los investigadores más atención a la exploración de los misterios del comportamiento bacteriano, ha ido ganado terreno la hipótesis según la cual las bacterias son seres con capacidad sensorial, que captan señales del entorno y, tras interpretarlas, responden a ellas adecuadamente.

Martin Dworkin, de la Universidad de Minnesota, ha brindado recientemente una demostración gráfica de la capacidad de respuesta pluricelular del depredador *Myxococcus xanthus*. Ha observado el despliegue de grupos de bacterias en busca de presa; al percibir en el agar la presencia de un grupo de bacterias (o incluso de partículas de vidrio o de plástico), presas potenciales, dan un giro brusco y se dirigen hacia él. Alcanzado el objetivo, las bacterias desplegadas distinguen los objetos comestibles de los que no lo son. Si resultan de su agrado permanecen en el lugar mientras se alimentan; pero si el material encontrado no es comestible, la búsqueda prosigue. Comportamientos de ese tipo, con propósito definido, se habían considerado siempre privativos de organismos superiores.

¿Poseen algún valor práctico los descubrimientos que acabamos de comentar? La industria relacionada con la biotecnología, ávida de bacterias transformadas por ingeniería genética susceptibles de convertirse en fábricas especializadas en la producción de complejas sustancias bioquímicas, se beneficiará sin duda de los estudios sobre células bacterianas que se especializan y controlan la síntesis de proteínas ayudándose de señales de comunicación intercelular. En el campo de la biodegradación, una profundización en los procesos pluricelulares redundará sin duda en una mejor utilización de las bacterias para eliminar sustancias tóxicas de suelos y aguas. Puede contemplarse incluso la posibilidad de introducir en determinadas bacterias algunas características propias de la pluricelularidad que optimicen la productividad o mejoren la capacidad de cepas específicas para degradar productos sintéticos. Una mejor comprensión del comportamiento de las bacterias facilitaría el control de la liberación de organismos modificados por ingeniería genética.

En el campo de la medicina, los avances en el conocimiento del comportamiento bacteriano incrementarían la eficacia de las terapias farmacológicas. J. William F. Costerton y sus colaboradores, de la Universidad de Calgary, en la provincia canadiense de Alberta, han descrito el caso de un paciente que sufría infecciones sanguíneas recurrentes, causadas por una colonia de *Staphylococcus aureus* que se había instalado en su marcapasos. De manera periódica se desprendían de la colonia algunas bacterias e infectaban la sangre. Aunque las células, aisladamente, eran sensibles a la penicilina, la colonia se mostraba resistente al antibiótico: como es el caso de muchas colonias bacterianas, estaba protegida por un revestimiento mucoso extracelular. Para terminar con la infección crónica no hubo más remedio que retirar el marcapasos y, con él, la indómita colonia bacteriana.

En otros casos de patogenia bacteriana se advierte una clara correlación entre la tendencia de las células a formar agregados y su capacidad para provocar una infección. Desde hace más de 25 años se sabe que el organismo causante de la gonorrea, *Neisseria gonorrheae*, forma diversos tipos de colonias en los medios de laboratorio. Las células de algunos tipos son virulentas, mientras que las de otros no lo son. Para que se produzca la infección, el organismo infeccioso ha de colonizar al hospedador; sospecho, pues, que la patogenia guarda una estrecha relación con la capacidad de aquél para formar organizaciones pluricelulares (que se refleja en los tipos de colonias).

Los bacteriólogos de primera hora, y entre ellos Louis Pasteur, advirtieron que era mucho lo que se podía aprender del estudio de estas células, las menores de las que pueblan la biosfera. Se ha avanzado notablemente en el conocimiento de la complejidad de estos organismos. Si, como acabo de proponer aquí, el desarrollo y el comportamiento bacterianos presentan rasgos muy refinados, típicos de los organismos superiores, es muy probable que la explicación de los mecanismos que utilizan para comunicarse entre sí influya en nuestro modo de abordar el procesamiento de la información que realizan todos los organismos.

Pese a su diminuto tamaño, la bioquímica, estructura y comportamiento bacterianos presentan tal complejidad que escapan a cualquier intento de descripción científica. Buscando un símil en la revolución microelectrónica de nuestros días, quizá tenga más sentido atribuir la pequeñez de esos organismos al refinamiento que a la simplicidad. No cabe duda de que las ideas que surjan del estudio de las interacciones entre los millares de millones de bacterias que conviven en un volumen de escasos milímetros cúbicos habrán de condicionar nuestro conocimiento de las restantes formas de vida.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NATURE OF THE SWARMING PHENOMENON IN *PROTEUS*. Fred D. Williams y Robert H. Schwarthoff en *Annual Review of Microbiology*, vol. 32, págs. 101-122; 1978.

MYXOBACTERIA: DEVELOPMENT AND CELL INTERACTIONS. Dirigido por Eugene Rosenberg. Springer-Verlag, Nueva York, 1984.

ORGANIZATION OF DEVELOPING *ESCHERICHIA COLI* COLONIES VIEWED BY SCANNING ELECTRON MICROSCOPY. James A. Shapiro en *Journal of Bacteriology*, vol. 169, nº 1, págs. 142-156; enero de 1987.

Pueden solicitarse al Servicio Audio-Visual de la Universidad estatal de Pennsylvania las siguientes películas:

BACILLUS CIRCULANS–AUFBAU UND VERHALTEN (CRECIMIENTO Y COMPORTAMIENTO DE *B. CIRCULANS*). Película muda, E183. Institut für den Wissenschaftlichen Film.

PROTEUS–BEWEGUNGSVERHALTEN (COMPORTAMIENTO MOTOR DE *PROTEUS*). Película muda, E271. Institut für den Wissenschaftlichen Film.

Polynyas en el océano Glacial Antártico

Son grandes espacios limpios de hielos en el mar que rodea la Antártida. Al dejar expuestas enormes superficies de agua, contribuyen al funcionamiento de la máquina térmica terráquea, que acopla el océano con la atmósfera

Arnold L. Gordon y Josefino C. Comiso

Durante el invierno austral (de junio a septiembre) el hielo cubre hasta 20 millones de kilómetros cuadrados del océano que rodea la Antártida, casi dos veces Europa. Desde los viajes del capitán James Cook a finales del siglo XVIII, los exploradores, balleneros y científicos han venido cartografiando, desde sus buques, el borde exterior del manto helado. No obstante, salvo por los informes de los contados barcos que sobrevivieron tras quedar aprisionados en los hielos, no era mucho lo que se sabía acerca del manto en cuestión.

Sin embargo, desde 1973 los sensores pasivos de microondas instalados a bordo de un satélite han permitido la inspección sistemática desde el espacio. Y esas observaciones han instado un cambio notable en la imagen que se habían formado los investigadores del océano Antártico. Uno de los más sorprendentes descubrimientos de la era de los satélites es que el manto de hielo no es en modo alguno continuo. Dentro de su perímetro abundan las grietas, de uno a 10 kilómetros de extensión. Más que la existencia de esas guías, así se llaman, sorprende hallar vastas regiones –de hasta 350.000 kilómetros cuadrados de área– completamente libres de hielo.

En estas regiones, denominadas polynyas, las aguas superficiales del océano Glacial Antártico, que rodea la Antártida, quedan en contacto con el gélido aire polar. Las polynyas y sus efectos sólo se conocen muy someramente, pero todo parece indicar que son al mismo tiempo el resultado de la espectacular interacción entre el océano y la atmósfera que tiene lugar en la Antártida y uno de los principales participantes en la interacción. Los intercambios de energía, agua y gases entre océano y atmósfera en las proximidades de la Antártida desempeñan un papel importante a la hora de determinar el movimiento en gran escala, la estructura y la composición química del océano y la atmósfera alrededor del globo. Las polynyas aceleran esos procesos al dejar expuesta directamente la superficie del océano Glacial a la atmósfera.

Hay dos clases principales de polynyas: las costeras y las oceánicas. Las costeras se producen cuando los fuertes vientos locales, originados en el continente antártico, arrastran el hielo lejos de las costas conforme se va congelando; dejan una franja libre de hielo entre la costa y el mar helado. Antes incluso de que los satélites suministraran los primeros datos, los investigadores conocían ya la existencia de las polynyas costeras. Lo que no impidió que se quedaran muy sorprendidos al enterarse por las observaciones desde el espacio de cuán extendidas se hallaban las polynyas costeras y las notables proporciones que alcanzaban. (En algunas polynyas costeras, la distancia de la costa al borde de los hielos llega hasta los 50 o 100 kilómetros.)

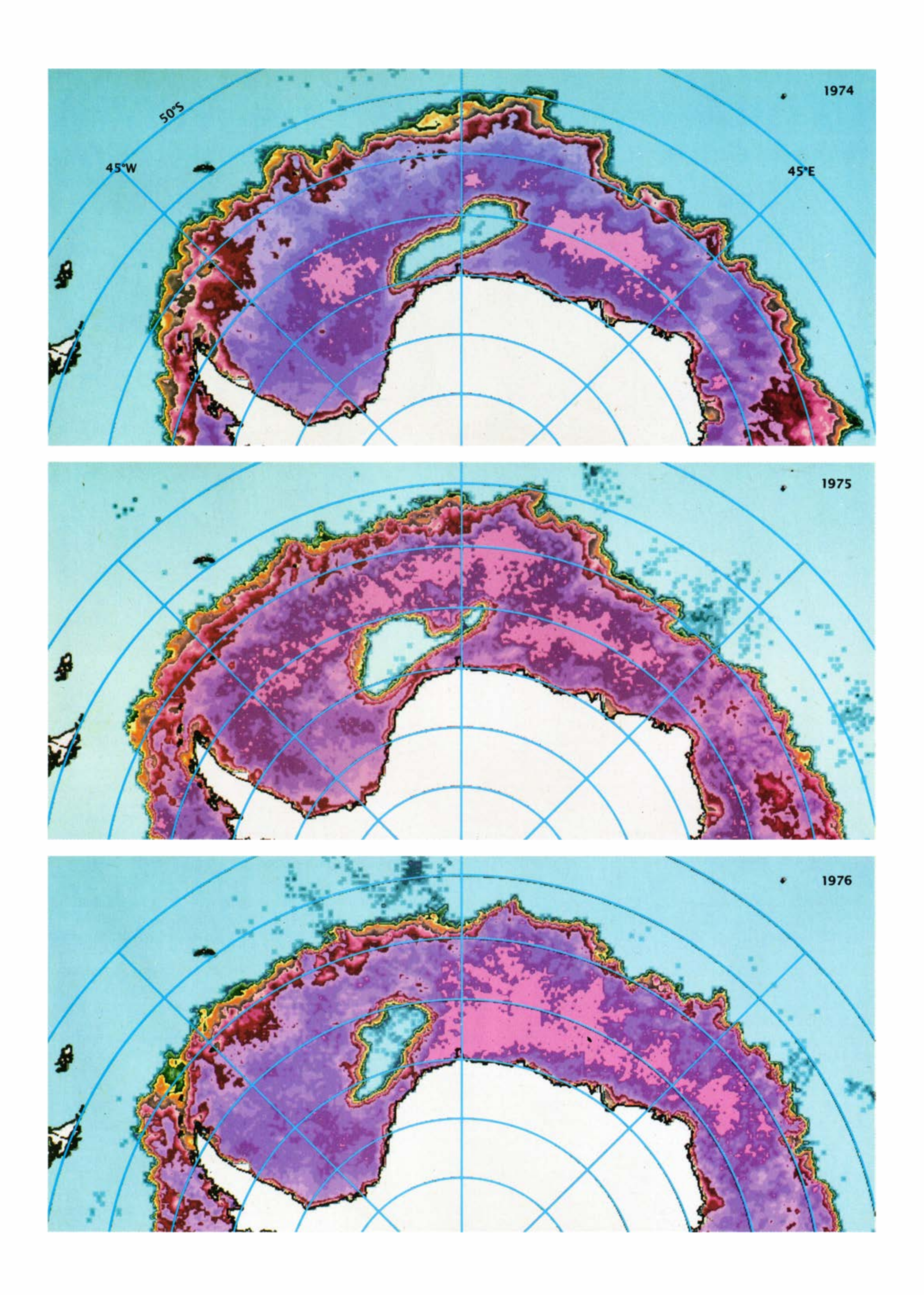
Las polynyas oceánicas se forman dentro del cuerpo de los hielos que cubren el océano, lejos de la costa. A este grupo pertenecen las polynyas mayores y las más duraderas. Todavía no se sabe bien qué fuerzas originan y mantienen las polynyas oceánicas, pero los datos procedentes de buques y satélites recogidos por los autores y por otros investigadores están permitiendo a los oceanógrafos esbozar hipótesis razonables.

Para comprender qué fuerzas específicas crean y mantienen las polynyas y los efectos que éstas puedan producir, es preciso comprender primero el papel que el océano Glacial Antártico cumple en la circulación general de los mares de todo el mundo y en el clima del globo en su conjunto. Porque el océano Glacial Antártico presenta anchos brazos de mar que se unen al resto de los océanos mundiales y porque es mucho mayor que el océano Polar de la región ártica, la Antártida ejerce una función de mayor alcance en la circulación oceánica global que la asignada al Artico.

Cuando la radiación solar calienta los océanos tropicales y subtropicales, el calor resultante se difunde hacia abajo, hacia aguas más profundas. El calentamiento solar produce también ta-

ARNOLD L. GORDON y JOSEFINO C. COMISO combinan la investigación a bordo de buques con la recabada de satélites en su estudio de las polynyas. Gordon es profesor de oceanografía física en la Universidad de Columbia y pertenece al observatorio geológico Lamont-Doherty de Columbia. Su investigación se centra en la circulación a gran escala y la mezcla en los océanos y su relación con el clima global. Comiso es físico del centro de vuelos espaciales Goddard de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio. Se incorporó al Goddard en 1979 tras realizar investigación en física experimental de partículas en varias instituciones. En el Goddard trabaja con los datos de microondas e infrarrojo de los satélites en el estudio de los procesos oceánicos y atmosféricos.

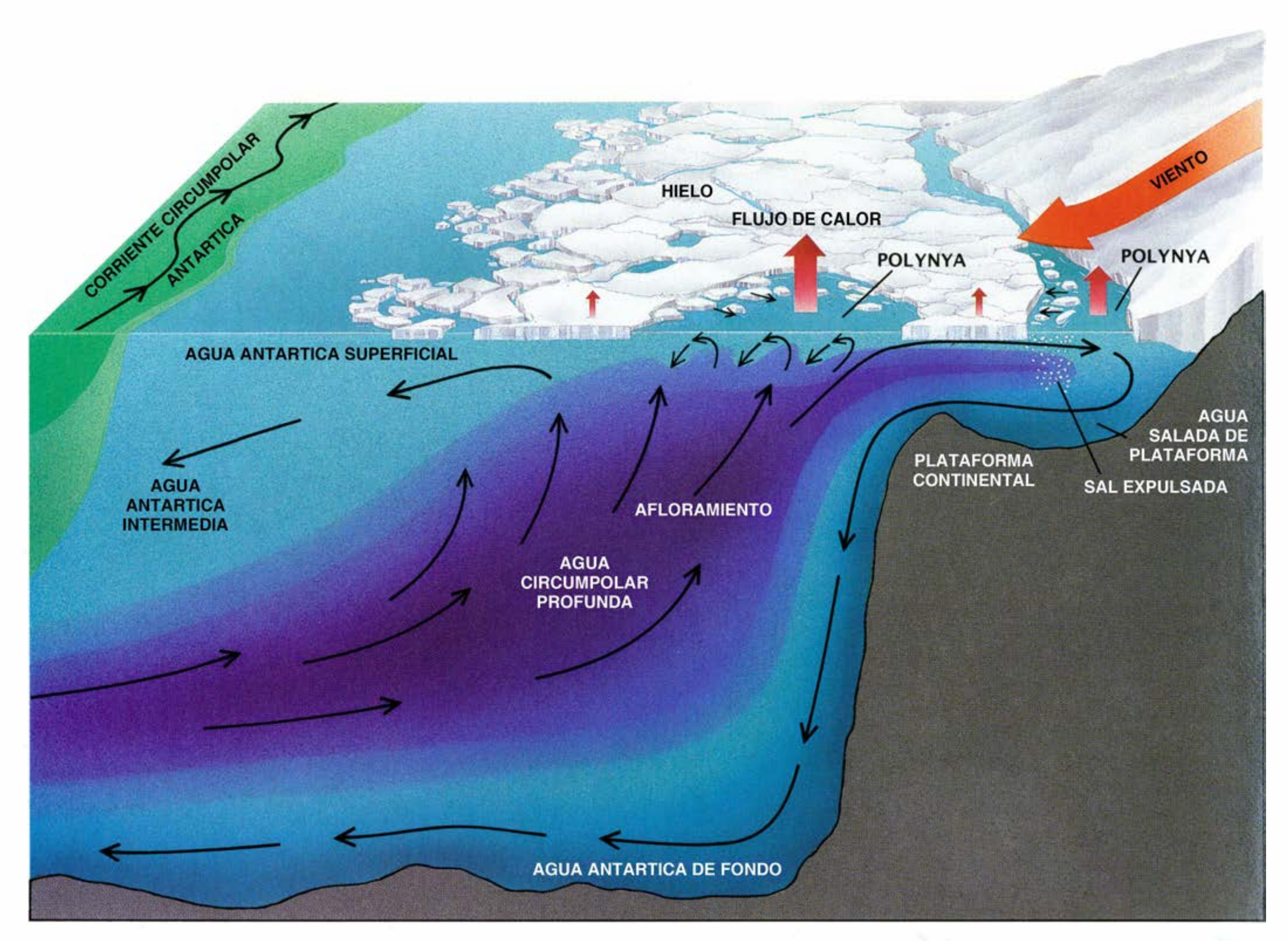
1. POLYNYA DE WEDDELL, así se denomina una enorme región libre de hielos que se formó durante tres inviernos australes consecutivos y se alojaba en medio del manto helado en el mar del mismo nombre. En estas imágenes de satélite, tomadas en septiembre de 1974 (*arriba*), 1975 (*centro*) y 1976 (*abajo*), la región blanca representa las tierras antárticas y, las coloreadas, zonas oceánicas cubiertas por hielos. Las regiones rosa y púrpura están cubiertas, casi por entero, de hielo, del que carecen las de color azul claro. En verano, la polynya desaparecía al fundirse la capa de hielo. En su apogeo, medía unos 350 por 1000 kilómetros. Produjo efectos detectables sobre la temperatura del océano hasta profundidades de 2500 metros.


1974
50°S
45°W
45°E
1975
1976

sas de evaporación bastante altas, lo que eleva la salinidad de las aguas superficiales; la sal en exceso, como el calor, se difunde hacia las profundidades. El calor y la salinidad de las aguas profundas se ven favorecidos por episodios de mezcla importante en el Atlántico Norte; en virtud de ellos, el agua superficial, relativamente caliente y con alta salinidad, se mezcla con la de abajo. La masa resultante de agua profunda, caliente y salina, se va extendiendo gradualmente hacia el océano Glacial Antártico. Allí, esta masa de agua, que llamaremos agua profunda circumpolar, asciende hacia la superficie, donde cede parte de su calor a la atmósfera y se torna una masa de agua fría y densa que se hunde hacia el fondo del mar. Esa masa, conocida por agua antártica de fondo, avanza hacia el Norte, por el fondo oceánico, para llegar hasta bastante más allá del Ecuador. Se trata de la mayor masa de agua de fondo del mundo. En su avance hacia el Norte, se va mezclando gradualmente con las capas superiores. El ciclo de calentamiento y enfriamiento comienza de nuevo.

El océano Glacial Antártico constituye, pues, un engranaje de la ingente máquina térmica que impulsa los movimientos de gran parte de los océanos del globo. Además, el movimiento vertical a gran escala que tiene lugar en el Antártico proporciona un mecanismo mediante el cual la química de la atmósfera influye en la química de las profundidades oceánicas, y viceversa. Estos movimientos verticales ventilan las profundidades oceánicas al empujar agua hacia la superficie, permitiendo con ello que se instaure cierto equilibrio con la temperatura y composición de la atmósfera, obligando después al agua a hundirse de nuevo. El proceso enfría las aguas de las profundidades oceánicas, rebaja su salinidad y restablece el nivel de oxígeno que había quedado mermado por la acción de los organismos. La subversión de las aguas oceánicas profundas favorece también el equilibrio entre las concentraciones oceánicas de ciertos gases disueltos, tales como el dióxido de carbono, y las concentraciones de esos gases en la atmósfera. De aquí que la subversión constituya un factor a considerar en el calentamiento por "efecto de invernadero", que puede producirse si se añade dióxido de carbono a la atmósfera.

Los efectos de la máquina térmica no acaban aquí. La tasa global de transporte de calor desde el Ecuador hacia el polo ayuda a determinar el grado de variación de la temperatura con la latitud a escala mundial. Lo que contribuye, a su vez, al mantenimiento de



2. CONFIGURACION DE LA CIRCULACION MERIDIANA del océano Glacial Antártico, que rodea la Antártida. Dicha configuración está dominada por el afloramiento de una masa de agua caliente y salina, llamada agua circumpolar profunda, y su transformación en agua antártica superficial, que termina por hundirse y convertirse en agua antártica intermedia o agua antártica de fondo. La circulación está impulsada por el viento y el intercambio de calor y agua dulce entre el océano y la atmósfera. El agua que ha aflorado se enfría y se torna bastante dulce al perder calor por cesión a la atmósfera y enriquecerse en agua dulce que proviene de las precipitaciones y la fusión de los hielos. Parte del agua superficial avanza hacia el Norte y se hunde gradualmente, contribuyendo a la formación de agua antártica intermedia. Otra fracción del agua superficial se dirige hacia el polo; finalmente se hunde y se encamina hacia el Norte en forma de agua antártica de fondo. En la circulación intervienen las polynyas. En las llamadas oceánicas (*centro*) se desprende rápidamente calor que pasa a la atmósfera, porque no hay capa aislante de hielo. Las corrientes de convección, en las que el agua caliente asciende mientras que el agua fría desciende, aceleran el movimiento del agua caliente hacia la superficie. Las llamadas polynyas costeras (*derecha*) se forman cuando los vientos despejan la zona de hielo nada más congelarse. La región abierta resultante desprende calor rápidamente y la sal, rechazada al crearse hielo marino, aumenta así la densidad del agua.

muchos procesos que rigen el tiempo y el clima de la Tierra.

De entre las fuerzas que promueven la subversión de la masa de agua (su movimiento vertical), en el océano Glacial Antártico las principales podrían ser el empuje hidrostático y el viento. El primero confiere al océano una estructura estratificada: las masas de agua quedan dispuestas según su densidad (a su vez determinada por la temperatura y salinidad de las aguas). El viento, por el contrario, tiende a perturbar esta estratificación. Además, el intercambio de calor y agua de baja salinidad entre las aguas superficiales y la atmósfera altera la densidad de aquéllas y puede así estimular las corrientes de convección (provocadas por el empuje, que impele hacia arriba el agua menos densa y hace descender a la más densa) que tienen como consecuencia un reajuste de la estratificación.

La capa de agua superior del océano Antártico, que se extiende hasta 100 metros de profundidad, se llama agua superficial antártica. Está fría a causa de su proximidad con la gélida atmósfera antártica; su escasa salinidad se debe a que, en el océano Glacial Antártico, las precipitaciones (y el hielo que se derrite en los glaciares antárticos) superan a la evaporación.

Al Norte de los 65° de latitud Sur, aproximadamente, los vientos dominantes impulsan gran parte del agua superficial hacia el Norte —alejándola del polo—, mientras que al Sur de esa latitud otros vientos impulsan el agua superficial hacia el polo. La divergencia resultante a 65° Sur provoca un afloramiento: el agua de las profundidades es forzada a ascender para reemplazar a la que ha sido empujada hacia el Norte o hacia el Sur. El bombeo tiene como resultado que el agua más caliente y salina, que se encontraba bajo el agua superficial antártica, suba hasta la superficie, con lo que pasa a formar parte del agua superficial antártica.

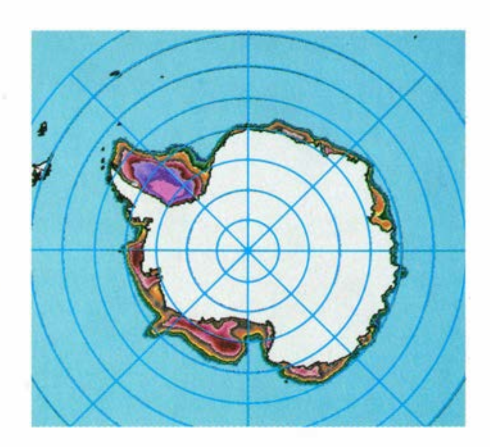
La fuente de agua caliente es el agua circumpolar profunda, de cuyo aporte al océano Glacial Antártico es responsable en parte el afloramiento provocado por el viento. Aunque el agua circumpolar profunda, que se extiende hasta unos 2000 metros, está más caliente que el agua superficial, posee, sin embargo, una densidad ligeramente mayor debida a su salinidad, bastante elevada. Por esa razón tiende a permanecer bajo el agua superficial.

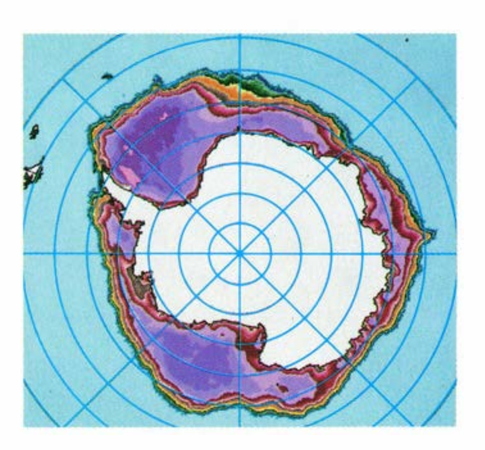
Al sur de los 60°, el agua superficial y la más profunda tienen densidades muy parecidas, por cuya razón la estabilidad de la estratificación es precaria. Basta una pequeña fuerza para alterarla. El impulso viene suministrado por el viento y por las variaciones en el equilibrio del agua dulce de la capa superficial. Los vientos fuertes pueden inducir la mezcla de las dos capas, en particular si hay témpanos que ayuden a crear turbulencias. La formación del manto de hielo en invierno interviene también en la mezcla: cuando el agua de mar se congela, los cristales de hielo rechazan gran parte de la sal que contiene el agua de mar, expulsándola en forma de una salmuera concentrada que aumenta la salinidad de la capa superficial, alimentando así la posibilidad de que se mezcle con el agua profunda subyacente.

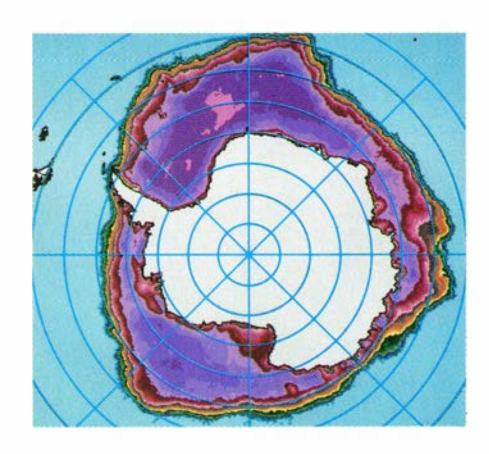
Cuando el agua circumpolar profunda se mezcla con la de más arriba en virtud de estos procesos, desprende calor a la atmósfera y se enfría, tornándose más densa. Al mismo tiempo, gran parte del agua superficial continúa siendo empujada, bien hacia el polo o bien lejos de él, por los vientos dominantes. La porción que se mueve hacia el polo continúa aumentando su densidad al irse mezclando con la salmuera expulsada por el hielo marino recién formado. Cuando este agua superficial alcanza la plataforma continental antártica, se hunde, y avanza mar adentro a lo largo de la plataforma continental, hasta el fondo del océano, dando lugar al agua antártica de fondo. De este modo, los efectos del empuje hidrostático y del viento se combinan para bombear agua caliente y profunda de latitudes más septentrionales, hacerle ceder su calor a la atmósfera antártica y hundirla después en el fondo oceánico.

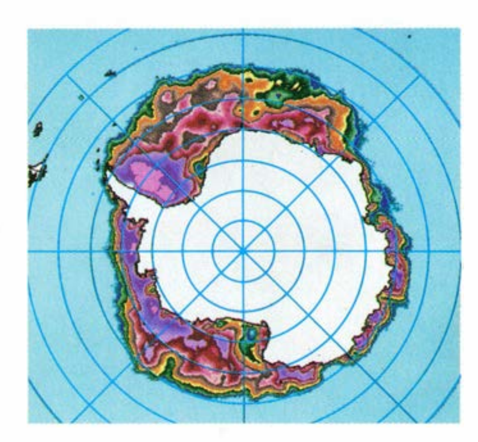
Aunque la formación de la cubierta de hielo actúa acelerando esta máquina térmica, la presencia del hielo tiende paradójicamente a dificultar el bombeo de agua de las profundidades oceánicas. La cubierta helada aísla la superficie del océano, inhibiendo el intercambio de calor oceánico. No obstante, algo de calor llega a la atmósfera por conducción a través del hielo, pero la conducción no es ni con mucho tan eficaz como el contacto directo con la atmósfera. Una capa de hielo de un metro de espesor (algo más gruesa que la mayor parte del manto de hielo antártico) puede reducir la pérdida de calor del océano en invierno hasta la décima o la centésima fracción.

¿Cómo afectan a estos procesos las polynyas, cuya capa de hielo se ha roto? No podría ni siquiera formular la pregunta de no haber mediado los









3. EXTENSION del manto de hielo antártico: varía de una estación a otra. Estas imágenes de satélite fueron tomadas (*de arriba abajo*) en marzo, junio, septiembre y diciembre de 1984, que correspondían, respectivamente, al verano, otoño, invierno y primavera australes. En el verano austral, el hielo cubre cuatro millones de kilómetros cuadrados de océano y, durante el invierno, unos 20 millones.

satélites, cuyas observaciones proporcionan información fidedigna, repetitiva y continua, y permiten también que los investigadores estén al día de las variaciones que tienen lugar a lo largo de períodos de tiempo muy cortos, de una semana o incluso de un solo día.

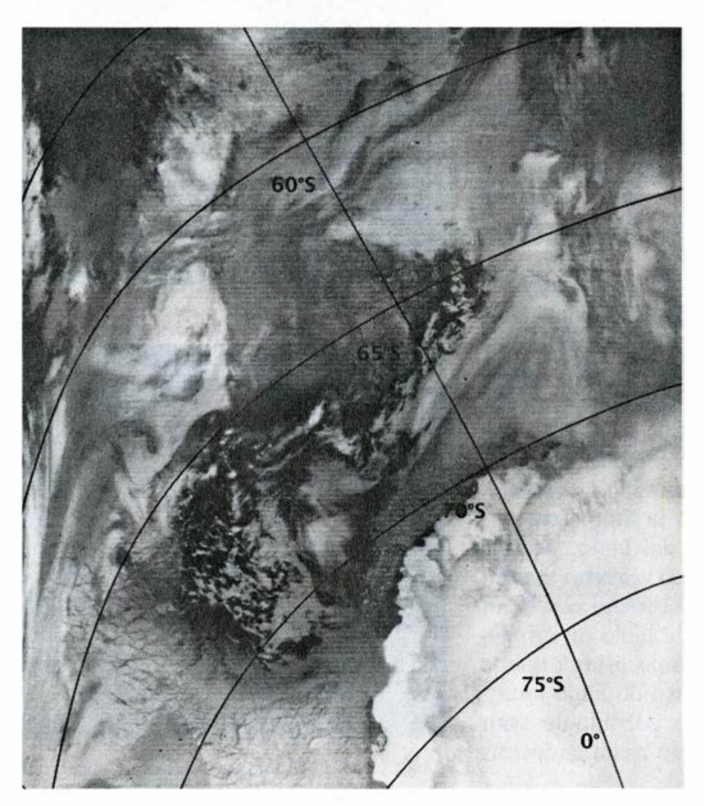
Los sensores instalados a bordo de satélites pueden operar en una amplia variedad de longitudes de onda y modos de observación. El sensor que se ha mostrado más versátil y útil para las observaciones en las regiones polares es el radiómetro pasivo de microondas, que detecta la radiación cuya longitud de onda está comprendida entre un milímetro y un metro, emitida en forma natural por diversos materiales. Esta radiación, emitida durante los períodos de oscuridad lo mismo que durante las horas de luz, atraviesa la mayor parte de las nubes, lo que posibilita observar una determinada región a cualquier hora del día y sin importar las condiciones atmosféricas. El radiómetro de microondas es óptimo para el control de la cubierta de hielo, pues a ciertas longitudes de onda dentro de las microondas la emisividad del hielo difiere bastante de la emisividad del agua.

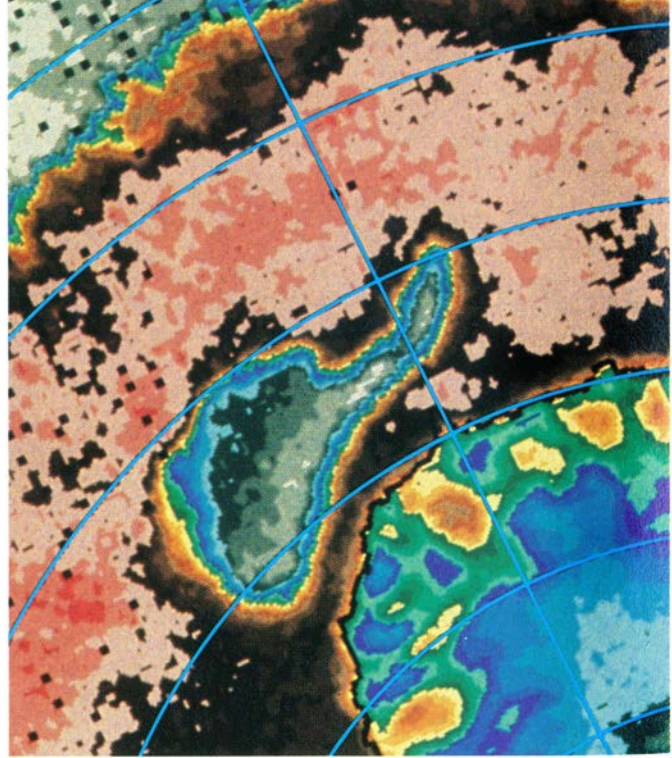
La cantidad de radiación emitida en una longitud de onda dada por una superficie oceánica helada depende de cierto número de variables: la temperatura del hielo, su espesor, salinidad y la nieve que lo cubre. Mediante observaciones simultáneas en distintas longitudes de onda, es posible eliminar las complicaciones introducidas por esos factores y obtener una buena estimación de la cobertura total de hielo en una región. Además, combinando observaciones en diferentes longitudes de onda se deducen los valores de muchas otras variables geofísicas: temperatura del hielo y de la superficie del mar, cantidad de vapor de agua en la atmósfera, posición del borde de los hielos e incluso velocidad del viento sobre el océano.

El primer sensor pasivo de microondas transportado en un vehículo espacial fue el radiómetro de exploración eléctrica de microondas, embarcado en el satélite *Nimbus 5*, que fue lanzado en septiembre de 1972. Este radiómetro, que medía la radiación en microondas en una sola frecuencia, transmitió buenos datos durante unos cuatro años. Para observaciones posteriores, los investigadores se sirvieron del radiómetro explorador multicanal de microondas a bordo del *Nimbus 7*. Este instrumento, que registraba la intensidad y polarización de la radiación en cinco frecuencias, estuvo en funcionamiento desde 1978 hasta 1987, año en que se desconectó el explorador de microondas a causa de ciertas irregularidades en la orientación del satélite. En 1987 se lanzó un nuevo sensor, llamado sensor especial de imágenes en microondas, dentro del Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa, asegurando así la continuidad de la cobertura por satélites.

La existencia y la extensión de las polynyas figuran entre los descubrimientos más interesantes que ha propiciado la observación por satélite del Antártico. Como hemos mencionado, existen dos clases de polynyas: las costeras y las oceánicas. Los datos de los satélites, las observaciones desde buques y los análisis teóricos han puesto ahora en claro que las dos clases de polynyas obedecen a causas diferentes y producen efectos distintos en el movimiento vertical del agua en las profundidades oceánicas.

Las polynyas costeras constituyen una suerte de fábricas de hielos marinos. Aparecen cuando los vientos locales empujan los hielos recién formados, alejándolos del continente en cuanto se congelan. Con ello queda al descubierto una zona de mar abierto en la cual se puede crear más hielo, continuándose el proceso. Las polynyas costeras se llaman también de calor latente; en efecto, el calor que liberan a



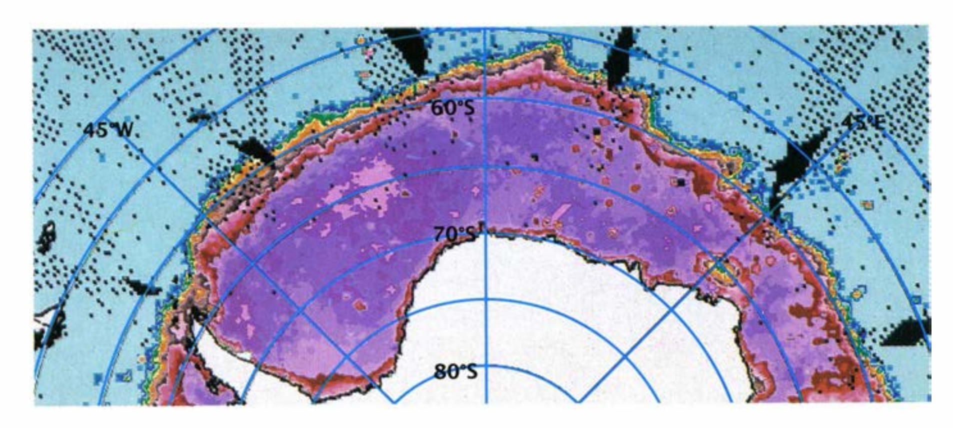


4. IMAGENES DE SATELITE de la polynya de Weddell obtenidas en agosto de 1975. Nos ilustran las ventajas de las imágenes tomadas con detector pasivo de microondas (*derecha*) sobre las convencionales de infrarrojo (*izquierda*). En el infrarrojo, la imagen de la polynya nos la ofrece convertida en una zona oscura en el centro, aunque las capas de nubes hacen imposible determinar la extensión de la polynya. La imagen pasiva de microondas, además de determinar la forma precisa de la polynya, identifica rasgos importantes: la frontera entre la capa de hielos antárticos y el mar abierto (*límite entre el azul y el gris en la parte superior izquierda*) y el borde de la masa de tierra continental (*borde anaranjado en la parte inferior derecha*). Los colores representan el "brillo" de la radiación en microondas emitida por los materiales de la superficie terrestre. El blanco y el gris indican las emisiones más débiles, que denotan zonas de mar abierto.

la atmósfera lo constituye principalmente el "calor latente" que el agua líquida desprende cuando se congela a temperatura constante. Se cree que el flujo de calor hacia la atmósfera instado por las polynyas de calor latente es superior a 300 watt por metro cuadrado, suficiente para añadir, cada día, una capa de hielo de 10 centímetros de espesor (que es inmediatamente alejada por el viento) a la región costera. El hielo generado en las polynyas de calor latente puede constituir la fuente de gran parte del hielo marino existente en el océano adyacente.

Mientras tanto, a medida que el hielo se forma en la polynya, la salmuera que expulsa eleva la salinidad del agua situada sobre la plataforma continental, impulsando así la corriente que da lugar al agua antártica de fondo. Según cálculos aproximados y basados en los datos de los satélites, la formación del hielo en las polynyas costeras deja un resto suficiente de sal como para formar agua de fondo con agua antártica superficial, a un ritmo de unos 10 millones de metros cúbicos por segundo.

La magnitud del fenómeno por el cual las polynyas costeras crean hielo, enfrían el océano y añaden sal al agua antártica de fondo cogió a los oceanógrafos completamente de sorpresa cuando por primera vez se dedujo tal cosa de las observaciones de los satélites. El conocimiento adquirido sobre las polynyas costeras ha ayudado a explicar ciertas características, antaño misteriosas, del océano Antártico, tales como la elevada salinidad de las aguas superpuestas a la plataforma continental (que se había medido durante los veranos australes) y el enorme volumen de agua antártica de fondo que fluye desde el Antártico a los océanos del resto del mundo.



5. POLYNYA DEL COSMONAUTA, en el mar del mismo nombre, a 45 grados de longitud Este y 65 grados de latitud Sur. El hecho de que ciertos puntos geográficos sean propicios a la formación de polynyas y zonas donde el manto de hielo es de poco espesor apoya la idea según la cual la topografía del fondo oceánico influiría sobre la formación de polynyas. La imagen se tomó en el mes de septiembre de 1986.

Las fuerzas que crean y mantienen las polynyas oceánicas revisten mayor complejidad que las que actúan en las polynyas costeras. Las polynyas oceánicas probablemente deben su existencia a las células de convección, que son regiones de circulación vertical en las que dentro de un área de unos kilómetros de lado, el agua caliente (en este caso el agua circumpolar profunda) se eleva hasta la superficie y se enfría, tras lo cual desciende para ser reemplazada por el agua ascendente, más cálida. En las polynyas oceánicas el agua cálida en continuo ascenso fundiría el hielo que hubiera en la superficie y evitaría la ulterior formación del mismo. Las polynyas oceánicas se llaman también de calor sensible porque el proceso mediante el cual ceden calor guarda directa relación con un cambio de temperatura: se puede detectar.

A causa de la precaria estabilidad de la estructura estratificada del océano Glacial Antártico, pueden surgir células de convección aisladas bajo los hielos marinos en muchos lugares. ¿Por qué sólo algunas de ellas acaban produciendo polynyas? La respuesta tiene que ver con el tamaño, o escala espacial. Cuando se desencadena la convección bajo una capa de hielo marino, el ataque inicial de calor ascendente funde la mayor parte, si no todo el hielo inmediatamente por encima de la célula. Con ello resulta una película de agua dulce en la superficie. El agua dulce es menos densa que el agua cálida salada; la estratificación se mantiene, pues, estable: amortigua la convección, porque el agua caliente no puede atravesarla en su camino hacia la superficie. Aunque esa película inicial de agua dulce no bastara para amortiguar la convección, otras porciones de hielo fluirían hasta la polynya y se fundirían, suministrando con el tiempo la suficiente agua dulce para detener la convección.

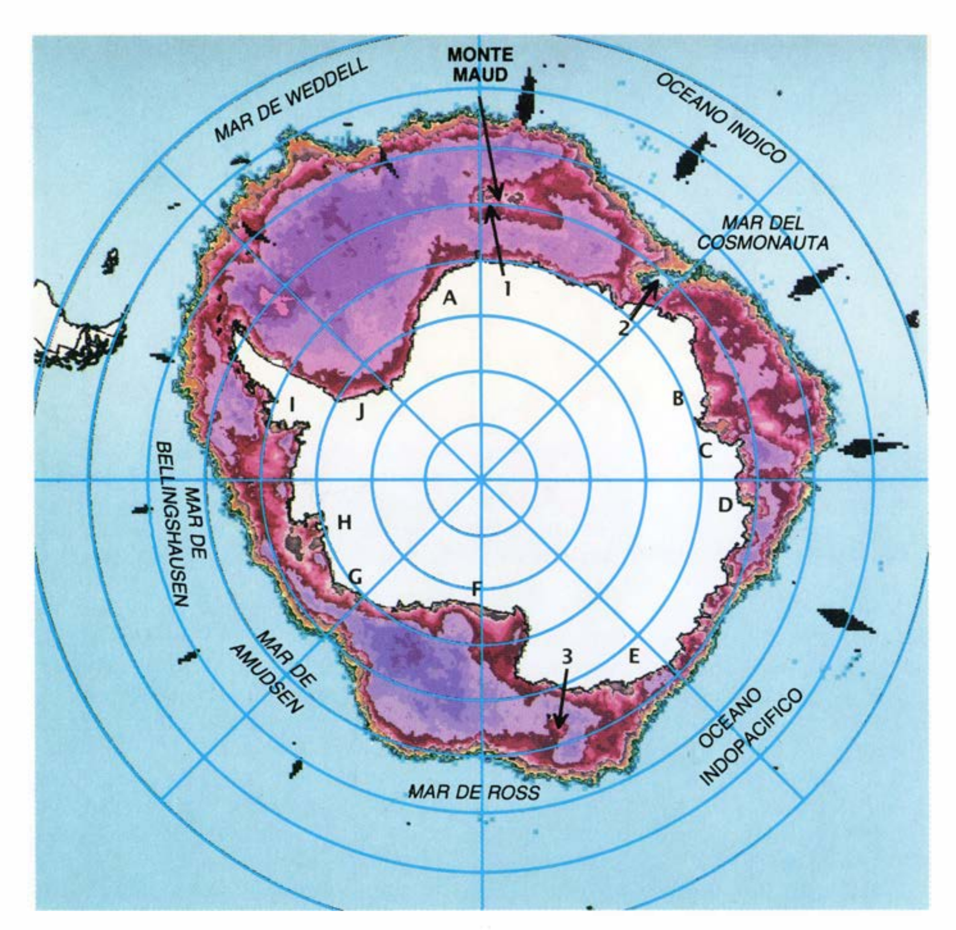
No obstante, si la polynya presentara inicialmente una gran superficie, podría automantenerse. El área de una polynya, dentro de la cual tiene lugar la convección, es proporcional al cuadrado de su radio. La cantidad de hielo que puede afluir a una polynya es proporcional a su perímetro; el cual es directamente proporcional a su radio. De ese modo, si una polynya tuviera una radio por encima de cierto umbral mínimo, el hielo no podría afluir con la rapidez requerida para detener la convección y sobreviviría la polynya.

Por razones relacionadas con la dinámica de fluidos aplicada a la Tierra en rotación, el diámetro de las células de convección en el océano Glacial Antártico no puede ser superior a unos cuantos kilómetros, entre 10 y 30. Una polynya grande automantenida tendría por tanto que constar de cierto número de células de convección, pegadas unas a otras, "hombro con hombro".

Las polynyas de calor sensible producen cierto número de efectos. Uno de ellos: sus células de convección bombean agua de las aguas circumpolares profundas y aceleran el proceso de transferencia de calor a la atmósfera. Todavía no se ha evaluado la importancia de este efecto dentro del funcionamiento general de la máquina térmica global, porque no se sabe si las grandes polynyas se forman con la frecuencia suficiente para adquirir relevancia climática. Podría tratarse, sin embargo, de un efecto sustancial, pues el océano desprende calor desde el mar abierto de manera mucho más eficaz que a través del hielo.

Las polynyas de calor sensible favorecen también la interacción química entre el océano y la atmósfera. A parte del agua que subyace bajo el manto de hielo, la que se encuentra expuesta puede intercambiar gases con la atmósfera con relativa facilidad, absorbiendo algunos y desprendiendo otros antes de hundirse de nuevo. Aunque el rápido ritmo de subversión en una polynya impediría que ninguna porción particular de agua llegase a alcanzar el equilibrio completo con la atmósfera, permitiría no obstante un considerable intercambio de gases. La existencia de grandes polynyas de calor sensible podría así alterar la naturaleza de la interacción atmósfera-océano, repercutiendo notablemente sobre la química de la atmósfera, el clima y las profundidades oceánicas en todo el mundo.

Gran parte de nuestro conocimiento relativo a las polynyas oceánicas proviene del estudio de un caso espectacular que se formó a mediados del de-



6. ESTA TOMA POLAR revela varias polynyas oceánicas (*1-3*) y costeras (*A-J*). La imagen, obtenida por satélite, muestra la cobertura media de los hielos durante un período de tres días en el invierno de 1980.

cenio de 1970 en la proximidad del mar de Weddell. La polynya de Weddell ofrecía varios motivos de interés; uno de ellos, su propio tamaño: en su máximo medía unos 350 por 1000 kilómetros.

Cabía destacar también su persistencia. Se detectó en el invierno austral de 1974. Durante el verano siguiente, la capa de hielo se fundió por completo en esa región del océano Glacial Antártico, como ocurre normalmente; pero cuando el manto de hielo se formó de nuevo en el invierno de 1975, apareció otra vez la polynya de Weddell. Se había trasladado ligeramente hacia el Oeste (en concordancia con la corriente superficial dominante en esa región). Si bien su forma y tamaño eran muy parecidos a los de 1974. El año siguiente fue testigo de la misma secuencia de acontecimientos: cuando la capa de hielo se volvió a formar en el invierno de 1976, la polynya reapareció, ligeramente al oeste de su posición de 1975 y algo más limitada.

En 1977 la polynya de Weddell no compareció. Mas su persistencia a lo largo de los tres inviernos anteriores sugiere la existencia, durante el verano, de algún mecanismo de "memoria", algún efecto residual en gran escala que pudiera volver a crear la polynya tras la fusión estival. Es probable que la clave de este mecanismo de memoria se encuentre en la salinidad. Cuando la capa de hielo se fundió en la primavera y verano australes, las regiones ajenas a la polynya debieron quedar cubiertas por una delgada capa de agua bastante dulce. Con el concurso de las fuerzas de empuje hidrostático, el agua dulce quedaría en la superficie sin mezclarse con la capa inferior. Sin embargo, en la zona afectada por la polynya la salinidad superficial habría sido mayor al no existir allí hielos flotantes que se fundieran.

En el invierno siguiente, cuando la fría atmósfera empezase a extraer calor del agua superficial, la estratificación de la región de la polynya se habría tornado inestable: el agua salada, al enfriarse y adquirir, por tanto mayor densidad, se habría hundido, mientras que el agua más cálida de las capas inferiores habría ascendido, estableciéndose nuevas células de convección y volviendo a crear la polynya. En las otras zonas, el agua bastante dulce de la superficie se congelaría sin más, restableciendo la capa de hielo antártica.

Los efectos de la polynya de Weddell estaban en consonancia con su tamaño. Dejó una clara impronta en aguas alejadas de la superficie. En este sentido, unas mediciones de temperatura a diversas profundidades realizadas en la zona de la polynya durante los veranos de 1973 y 1977 (esto es, antes y despues de la aparición de la polynya) ponen de manifiesto espectaculares cambios en la temperatura de las aguas profundas. Los cambios adquieren toda su magnitud si se tiene en cuenta la notable estabilidad de las aguas profundas del océano durante cortos períodos de tiempo. Las temperaturas medidas en la región en 1977 arrojaron hasta 0,8 grados menos que las de 1973 en todas las profundidades menores de 2500 metros.

En la polynya, el calor perdido habíase transportado presumiblemente, hasta la superficie por la convección. Estimaciones razonables sugieren que el ritmo de bombeo necesario para transportar tal cantidad de calor habría llegado a seis millones de metros cúbicos por segundo durante el invierno, con la polynya en actividad. Durante el proceso, la polynya en cuestión pudo haber producido hasta la mitad del agua antártica de fondo que salió del mar de Weddell.

¿Cuál fue la causa de que la polynya de Weddell se formase precisamente en ese sitio? Según la explicación más plausible, la topografía del fondo oceánico desempeñó un papel importante. La primera aparición de la polynya se produjo directamente por encima de un accidente llamado alto o monte de Maud, que es una montaña submarina. El fondo está aquí unos 3500 metros más próximo a la superficie que en otras regiones. Tal vez el agua profunda circumpolar se desvíe hacia la superficie al pasar por el alto de Maud. Esto "predispondría" la región de suerte tal que otros sucesos, tales como una mezcla más activa de lo normal debido a borrascas con fuertes vientos, atraerían probablemente más agua cálida y salina a la superficie, desencadenando la formación de células de convección.

Los datos recogidos por satélites desde 1976 aportan indicios en favor de la hipótesis. En muchos de esos años, las mediciones en microondas revelan polynyas o zonas de hielos muy finos y separados en la vecindad del monte Maud. Algo parecido se encuentra en una región llamada mar del Cosmonauta, a unos 65° de latitud Sur y 45° de longitud Este, donde la circulación oceánica, tal vez en respuesta a la topografía de fondo, parece también predispuesta a la formación de células de convección. En el mar del Cosmonau-

ta, igual que sobre el alto de Maud, se forman frecuentes polynyas pequeñas y zonas en las que el hielo tiene poco espesor. Estas polynyas no sobreviven por lo general un invierno entero.

Para comprobar estas hipótesis, uno de los autores (Gordon) participó en el proyecto de penetración a través de la capa de hielo hasta alcanzar la región del alto de Maud en invierno. El primer intento se produjo en el invierno de 1981, con el buque soviético *Mikhail Somov*. En este viaje no pudimos llegar hasta dicho monte, aunque penetramos o bastante para recoger datos sobre las interacciones entre las aguas profundas y las superficiales bajo el manto de hielo. Hallamos una surgencia inesperadamente grande de agua del fondo en la capa superficial invernal; ello nos indujo a pensar en una corriente vertical, activa, de aguas profundas.

El segundo intento por acercarse hasta el Maud se llevó a cabo con éxito en el invierno austral de 1986. Lo acometió una expedición multinacional a bordo del buque germano-occidental *Polarstern*, del Instituto Alfred Wegener de Investigación Polar en Bremerhaven. Aunque no se ha cerrado el análisis de los datos que recogimos en esa expedición, podemos avanzar que había un afloramiento de aguas profundas sobre el alto de Maud. El hecho de que se diera un afloramiento en 1986, incluso sin formarse polynya, indicaba que la topografía del fondo oceánico estaba probablemente desviando la corriente de agua profunda circumpolar hacia arriba. Además de aclarar algunos mecanismos relacionados con la creación de la polynya de Weddell, el viaje del *Polarstern* representa una manera nueva e interesante de estudiar los océanos: combinar las observaciones a gran escala de la superficie realizadas por satélites con la investigación local a bordo de buques.

El estudio de las polynyas está aportando a los oceanógrafos un nuevo conocimiento de los mecanismos que actúan en el océano Glacial Antártico. Merced a ello, pueden abordarse, desde nuevas perspectivas, los procesos que rigen gran parte del clima del globo y se plantean al propio tiempo nuevas e importantes cuestiones. Enunciemos una: ¿altera la convección en las grandes polynyas, así la de Weddell, la tasa de intercambio del dióxido de carbono entre el océano y la atmósfera? El agua profunda que surge al Sur de 60° de latitud austral es rica en dióxido de carbono y desprende a la atmósfera cantidades importantes. Como las polynyas aceleran el ascenso del agua profunda circumpolar, sería de esperar que favoreciesen el ritmo de desprendimiento de dióxido de carbono, contribuyendo tal vez al calentamiento global previsto en virtud del efecto de invernadero.

Por otra parte, según indicamos antes, la agitación en las polynyas es tan viva que ninguna lengua de agua pasa suficiente tiempo cerca de la superficie para poder intercambiar mucho dióxido de carbono con la atmósfera. Se desconoce, pues, el efecto neto de las polynyas sobre el nivel de dióxido de carbono atmosférico. Ni tampoco se sabe qué efecto podría ejercer el calentamiento que se espera en la atmósfera sobre la frecuencia o extensión de las futuras polynyas.

¿Cuál es la incidencia de las polynyas en el intercambio entre aguas superficiales y profundas que tiene lugar en el Antártico? Sabemos que la polynya de Weddell tuvo un papel destacado, enfriando gran volumen de océano y poniendo en contacto agua superficial con la atmósfera a lo largo de una extensa superficie. ¿Son esas polynyas ingentes un episodio raro, u ocurren con relativa frecuencia? ¿En qué medida el afloramiento que se produce cerca de la plataforma continental depende directamente de las polynyas? Los oceanógrafos tienen ahora los medios para responder a esos interrogantes y otros más. La combinación de observaciones exhaustivas y continuas desde satélites con las detalladas observaciones *in situ* durante el invierno permite ahora la construcción de modelos todavía más precisos de esos procesos, vitales y de largo alcance, que tienen lugar en el océano Glacial Antártico.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WEDDELL DEEP WATER VARIABILITY. Arnold L. Gordon en *Journal of Marine Research*, Vol. 40, Suplemento, págs 119-217; 1982.

ANTARTIC SEA ICE, 1973-1976: SATELLITE PASSIVE-MICROWAVE OBSERVATIONS. H. Jay Zwally, Josefino C. Comiso, Claire L. Parkinson, William J. Campbell, Frank D. Carsey y Per Gloersen. Publicación especial de la NASA 459; 1983.

ANTARTIC OFFSHORE LEADS AND POLYNYAS AND OCEANOGRAPHIC EFFECTS. H. Jay Zwally, Josefino C. Comiso y Arnold L. Gordon in *Oceanology of the Antartic Continental Shelf*, editado por Stanley S. Jacobs. American Geophysical Union, 1985.

RECURRING POLYNYAS OVER THE COSMONAUT SEA AND THE MAUD RISE. J. C. Comiso y A. L. Gordon en *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, Núm. C3, pág. 2819-2833; 15 de marzo, 1987.

Neurobiología de la alimentación de las sanguijuelas

Un único neurotransmisor, la serotonina, instrumenta la conducta alimentaria de la sanguijuela. El descubrimiento ayuda a explicar por qué los metabolitos neuroquímicos intervienen en el comportamiento

Charles M. Lent y Michael H. Dickinson

En *La Reina de Africa*, Humphrey Bogart, molesto por las sanguijuelas que se le habían pegado al cuerpo, expresa un sentimiento generalizado cuando exclama: "¡Si algo odio en este mundo son las sanguijuelas–inmundos demoniejos!" Sin embargo, para un neurobiólogo, ese gusano chupador de sangre resulta de lo más hermoso. Posee un sistema nervioso sencillo y muy organizado; sus neuronas son grandes, fácilmente identificables y accesibles a los microelectrodos. Virtudes que convierten a la sanguijuela en un animal particularmente útil para estudiar la actividad de determinadas neuronas. Además –valga la justicia poética–, las repugnantes prácticas de alimentación de este animal han proporcionado las pistas decisivas para que nuestro laboratorio haya descubierto la función de un importante grupo de neuronas.

El nombre científico de la sanguijuela, *Hirudo medicinalis*, refleja la utilización médica del animal en la práctica, antaño popular, de las sangrías, o flebotomías. Se mencionan ya las sangrías con sanguijuelas en los textos de Galeno, médico griego del siglo segundo. Avicena, médico y filósofo árabe del Medievo, cuenta su modo de empleo con puntilloso detalle. En la Edad Media, se convirtió en uso habitual del tratamiento de muchas enfermedades, hasta el punto de que el término "sanguijuela" designaba desde cualquier tratamiento médico, cataplasma o medicina hasta el médico mismo.

La popularidad del empleo de sanguijuelas llegó a su culmen en las postrimerías del siglo XVIII y principios del XIX. Francia importaba anualmente entre 30 y 40 millones de sanguijuelas. La demanda de *Hirudo* adquirió tal volumen que corrió peligro de extinción en toda Europa Occidental, donde todavía hoy se encuentra en una situación de precariedad. A finales del siglo XIX y principios del XX, cayó la utilización de sanguijuelas y se limitó, fundamentalmente, a la eliminación de sangre de las moraduras.

Dentro de la onda del redescubrimiento de muchos remedios populares en que nos estamos moviendo, y dada la dilatada historia del empleo de sanguijuelas, no debiera sorprendernos el renacimiento de éstas en la medicina moderna. En Europa y Norteamérica se están empleando como auxiliares postoperatorios en cirugía plástica y en la cirugía de reimplantación de extremidades amputadas. Las sanguijuelas aumentan el éxito de esas operaciones, pues eliminan la sangre sobrante y evitan, con ello, que los tejidos se necrosen mientras crecen los capilares. Además, son fuente de hirudina, vigoroso anticoagulante cuyo gen acaba de clonarse; su saliva podría, además, impedir la propagación de los tumores.

Pese a la larga convivencia entre la ciencia médica e *Hirudo*, apenas si se conocía hasta hace poco el comportamiento de alimentación natural de las sanguijuelas. Había, pues, que empezar por aclararlo. Durante ese trabajo previo hemos descubierto aspectos cruciales del papel funcional que desempeña un grupo específico de neuronas de su sistema nervioso.

Las sanguijuelas son anélidos, gusanos segmentados, que han evolucionado a partir de las lombrices. Presentan una ventosa en cada extremo: en la de la cabeza se aloja la boca y, la mayor, la de cola, la emplean para arrastrarse. Descubrimos que los individuos hambrientos descansaban en la orilla de las charcas, en la superficie del agua, hasta que las ondas del oleaje que producen los mamíferos, su principal fuente de sangre, las ponían en alerta. Entonces, las sanguijuelas orientaban la cabeza hacia el foco de olas y nadaban formando ondulaciones. Aunque no siempre alcanzan su objetivo, sus intentos resultan extraordinariamente precisos: la mayoría no se aparta más de 25 grados de la fuente de la ola.

La sanguijuela se detiene cuando establece contacto con un objeto y lo explora con las ventosas. Cuando encuentra una zona caliente, muerde. (Hemos confirmado la atracción que sienten las sanguijuelas por los cuerpos calientes: se hacinan debajo de un vaso de agua tibia colocado sobre la tapa de un acuario.) Si el mordisco no produce sangre, la sanguijuela sigue explorando y ensaya en otra región caliente. Para estudiar la conducta mordedora colocamos las sanguijuelas sobre una capa de parafina dispuesta sobre una superficie caliente y contamos el número de mordiscos que había en la cera. Las tres mandíbulas en sierra del animal deja-

CHARLES M. LENT enseña biología en la Universidad estatal de Utah. Doctor en biología marina por la Universidad de Delaware en 1967, su interés por las bases nerviosas del comportamiento le llevó a realizar investigaciones postdoctorales en sanguijuelas junto con Gunther S. Stent, de la Universidad de California en Berkeley. Ha ocupado cargos docentes en el Beloit College, la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook y la de Brown. MICHAEL H. DICKINSON realizó importantes contribuciones a las investigaciones que se citan en este artículo siendo alumno de licenciatura del laboratorio de Lent. Prepara el doctorado en neurofisiología en la Universidad de Washington.

ban una señal que recordaba el emblema de la Mercedes-Benz. La frecuencia de mordedura era máxima cuando la parafina se encontraba a 35 o 40 grados Celsius, el intervalo de temperatura corporal de los mamíferos.

El aparato de alimentación de *Hirudo* consta de varios músculos y glándulas. Para cortar la piel del huésped, las contracciones rítmicas de los músculos mandibulares mueven hacia delante y hacia atrás las tres mandíbulas semicirculares dentadas, secretándose saliva de los conductos situados en alternancia con los dientes. Esa disposición inyecta profundamente en las incisiones la saliva, portadora de moco lubricante y del inhibidor de la coagulación, la hirudina. A medida que fluye la sangre en la cavidad bucal de la sanguijuela, se bombea al buche por medio de contracciones rítmicas de la faringe, sincronizadas con los movimientos de mordedura.

En el laboratorio alimentábamos las sanguijuelas con una mezcla de hematíes y líquido de cultivo de tejidos. Tibia, la mezcla se colocaba en un tubo de ensayo que se sellaba con una capa de parafina, a través de la cual comían las sanguijuelas. Se alimentaban con rapidez e ingerían sangre durante unos 30 minutos, hasta llenar el buche y sus divertículos. La ingestión es estereotipada y compulsiva: ni siquiera los estímulos fuertes, como el intento de arrancarla o incluso de lesionarle el cuerpo, disuaden al tenaz gusano una vez ha empezado a alimentarse. Ingiere grandes cantidades de sangre (de siete a nueve veces el propio peso de la sanguijuela), lo que se cuenta entre los mayores ágapes animales. No hay por qué sorprenderse, pues, si la sanguijuela se alimenta muy de vez en cuando. En el laboratorio, el período de saciedad suele durar un año entero.

Después de alimentarse, la sanguijuela está distendida y apenas es capaz de moverse. Las sanguijuelas saciadas se comportan de forma muy distinta de las hambrientas. Buscan aguas más profundas, tienden a arrastrarse en oquedades de piedras y troncos y no muestran la natación espontánea de las sanguijuelas hambrientas. Ni muerden las superficies calientes; antes bien, las evitan, apartando la cabeza y alejándose de ellas.

¿A qué obedecía ese cambio brusco de comportamiento? Nos preguntamos si la distensión de la pared corporal constituía el estímulo para acabar la ingestión. Cuando distendíamos sanguijuelas que estaban alimentándose, inyectándoles solución salina en el buche, dejaban inmediatamente de comer. Observamos también lo siguiente: al cortar la pared corporal de ejemplares saciados y vaciarles el buche, volvían a morder si se encontraban sobre una superficie caliente. Descubrimos, por último, que si seccionábamos las sanguijuelas en el momento de alimentarse, para que perdieran la sangre, la conducta de ingestión se prolongaba durante horas. Por consiguiente, el estado conductual de la sanguijuela alterna entre el hambre y la saciedad, y el conmutador entre esas dos situaciones es la distensión.

Una vez descubiertos los componentes principales de sus hábitos alimentarios, nos aprestamos a abordar las bases neurológicas de dicho comportamiento. En *Hirudo*, y en otros gusanos segmentados, cada segmento contiene un ganglio, o conjunto de células nerviosas. El sistema nervioso central de la sanguijuela consta de 32 ganglios, cada uno de los cuales se comunica con el resto del cuerpo por medio de dos pares de raíces laterales [*véase la figura 4*]. Los 21 ganglios de la zona corporal media se ensartan en los conectores longitudinales a modo de cuentas de un collar. Cuatro de los ganglios restantes están fundidos, en la cabeza, formando



1. SANGUIJUELAS pegadas al torso de Humphrey Bogart en una memorable escena de *La Reina de Africa*. Katharine Hepburn les aplica sal, procedimiento que les provoca el vómito y les hace retraer las fauces. Bogie afirma que así se evitará que dejen las cabezas insertas en la piel, pero eso no lo hacen las sanguijuelas.

el ganglio subesofágico, y los otros siete, fundidos en la cola, constituyen el ganglio caudal.

Cada ganglio consta de unas 400 neuronas. En las sanguijuelas, las neuronas sensoriales y motoras extienden sus axones −largas prolongaciones celulares que transportan el impulso nervioso− por las raíces laterales; allí se envían las señales hacia detectores sensoriales y hacia células efectoras: los músculos y glándulas. Las interneuronas de las sanguijuelas (neuronas que se comunican exclusivamente con otras neuronas) presentan axones que se extienden sólo hacia los conectores.

Las células nerviosas de todos los animales, incluidas las sanguijuelas, comparten diversas propiedades fisiológicas fundamentales. Las membranas neuronales presentan polarización eléctrica: los iones con carga negativa del interior celular determinan que el potencial eléctrico del interior celular se sitúe entre −50 y −80 milivolt respecto del exterior. Si fluyen iones positivos al interior de la célula, la membrana se despolariza; cuando la diferencia de potencial entre el interior y el exterior desciende por debajo de un valor crítico, denominado umbral, la célula desencadena un impulso eléctrico: el potencial de acción. Los potenciales de acción avanzan, con gran rapidez, a lo largo de los axones. Por ejemplo, el impulso de una neurona motora viaja desde el ganglio hasta el músculo y hace que éste se contraiga, mientras que los impulsos de las neuronas sensoriales viajan desde la periferia hacia el interior.

Las neuronas se intercomunican en las sinapsis, estructuras en forma de botón situadas en los terminales de los axones. Dos son los tipos de sinapsis: eléctricas y químicas. Las eléctricas conectan el citoplasma de las neuronas, permitiendo el flujo directo de iones entre ellas. El acoplamiento hace que las células alcancen el mismo potencial y, por tanto, presenten niveles similares de excitabilidad. Tales sinapsis permiten la conducción en cualquier sentido y en la sanguijuela desempeñan un papel decisivo, pues sincronizan la actividad de un grupo específico de neuronas.

Por su parte, las sinapsis químicas acarrean información por una ruta extracelular y sólo en un sentido. El impulso desencadena la liberación de un producto químico de los terminales de la célula presináptica (en la que se origina el impulso). Ese "neurotransmisor" se difunde a la célula postsináptica, se une a receptores propios y altera su potencial de membrana.

Las sinapsis químicas pueden ser excitadoras (que despolarizan la célula postsináptica y aumentan la probabilidad de que descargue un impulso) o inhibidoras (que disminuyen esa probabilidad). Una misma neurona puede excitar unas células e inhibir otras, en función de las propiedades de los receptores postsinápticos. Las diversas entradas sinápticas, excitadoras e inhibidoras, que recibe una neurona se integran y determinan, en cada instante, el potencial de membrana; esto es, el conjunto de entradas fija el nivel de la excitabilidad celular. Mediante estudios de gran elegancia se ha demostrado que, en la sanguijuela, la actividad sináptica entre neuronas induce comportamientos estereotipados sencillos: contracción muscular refleja, natación oscilatoria y contracción rítmica del corazón.

El juego de neurotransmisores de las neuronas de las sanguijuelas es similar al que se encuentra en el cerebro de los mamíferos. Lo forman la acetilcolina, el ácido gamma-aminobutírico (GABA), algunos péptidos y tres monoaminas: octopamina, dopamina y serotonina. Nos intrigó qué posibles funciones desempeñaría la serotonina cuando se descubrió, hace algunos años, que esa sustancia abundaba en las mayores neuronas de la sanguijuela, las células de Retzius.

Descritas en 1891 por el anatomista sueco Gustaf Retzius, fueron las primeras células que se identificaron en todos los ejemplares estudiados. Cada ganglio alberga un par de células de Retzius, cuyos axones penetran en las raíces laterales, se ramifican repetidamente y se proyectan extensamente entre los órganos periféricos del cuerpo. Las células poseen las enzimas que sin-

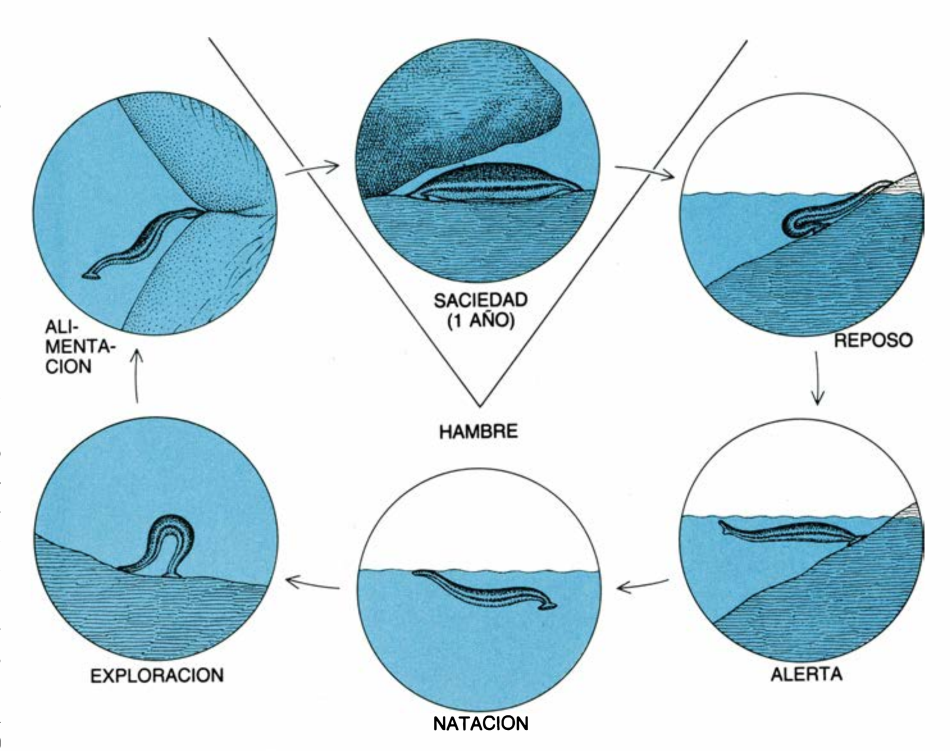
2. VISTA VENTRAL de un corte de cabeza de sanguijuela, donde se muestra el sistema nervioso y los órganos de alimentación. Las únicas células nerviosas representadas son las grandes neuronas que contienen serotonina (*azul*). El ganglio subesofágico posee, cerca de los bordes, dos grandes células laterales y, en el centro, cuatro pares de células de Retzius, descritas en 1891 por el anatomista sueco Gustaf Retzius. Los demás ganglios contienen dos células de Retzius cada uno y están unidos por conectores a lo largo del cuerpo. Las neuronas de cada ganglio prolongan sus axones hacia un par de raíces laterales que llegan hasta las glándulas y músculos periféricos. Los impulsos de las células de Retzius y las grandes células laterales sueltan serotonina en los órganos periféricos (*amarillo*), provocando el movimiento mandibular, la liberación de saliva, contracciones de los músculos faríngeos, secreción de moco y relajación de los músculos de la pared.

tetizan la serotonina; sus membranas la acumulan activamente. Entre las restantes neuronas que proyectan axones a la periferia, sólo otro par contiene serotonina: las grandes células laterales del primer segmento del sistema nervioso.

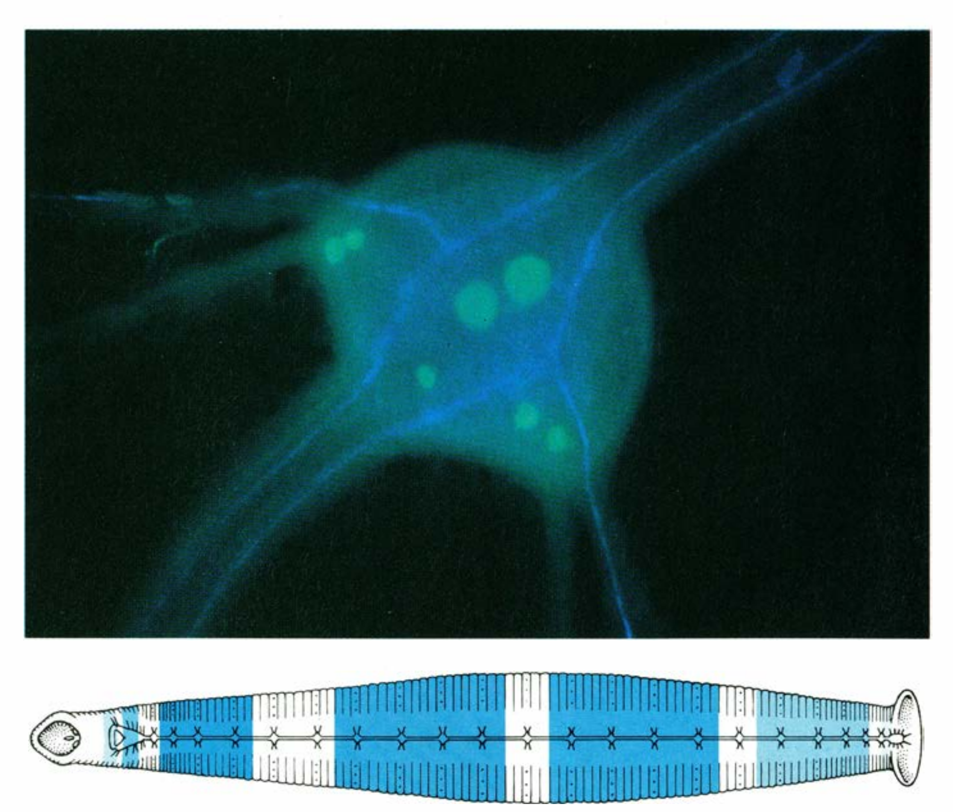
Por otra parte, los ganglios de la sanguijuela presentan cuatro tipos de interneuronas con elevadas concentraciones de serotonina. Dos clases están emparejadas y se encuentran en los extremos laterales de muchos ganglios. Las otras dos están representadas desigualmente en los ganglios distribuidos a lo largo de toda la sanguijuela. Las interneuronas posteromediales suelen presentarse en parejas en el ganglio frontal, solas en la zona intemedia del cuerpo y acostumbran a faltar en los ganglios posteriores. Además, en los primeros siete ganglios hay otros pares más de interneuronas anteromediales. Así, en la parte anterior del animal existen, por ganglio, alrededor de 10 neuronas con serotonina, cifra que disminuye hasta alrededor de cinco células en la posterior.

Recientemente hemos aplicado una técnica muy sensible, la cromatografía líquida de alta presión, para determinar si tales diferencias del número de células se correspondían con los niveles de serotonina de los ganglios. Se comprobó que, efectivamente, así era. En los ganglios anteriores, los niveles de serotonina quintuplicaban los de los ganglios posteriores. La reflexión retrospectiva nos permite sugerir ahora que de esas diferencias parece desprenderse que la serotonina y las neuronas de serotonina desempeñan alguna función desarrollada en la cabeza, por ejemplo, la alimentación.

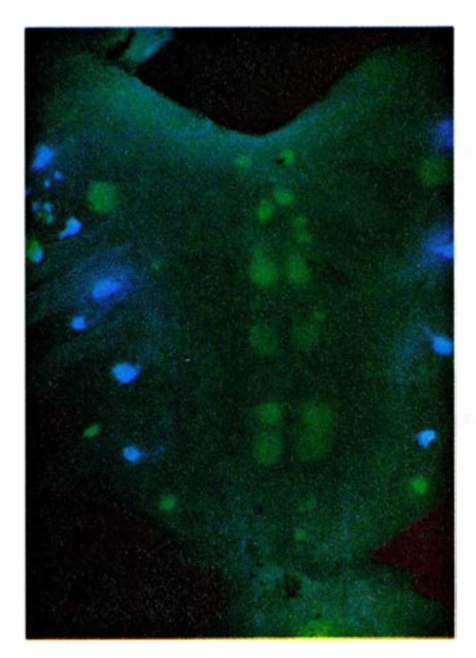
No obstante, y a pesar de los intensos estudios realizados, la función de las células de Retzius constituyó durante muchos años un misterio. Ahora bien, el tamaño de las estructuras biológicas suele reflejar su importancia funcional; resultaba, pues, difícil explicar que células de esa magnitud no desempeñaran alguna función de relieve. Hace unos 15 años, uno de nosotros (Lent) descubrió en estas células una aparente función sin importancia en la secreción de moco. Trabajando con preparaciones disecadas de ganglios de segmentos, conectados por sus raíces laterales a una sección de la pared de la mitad del cuerpo, aplicamos corrientes despolarizantes a membranas de células de Retzius para incrementar la frecuencia de los impulsos celulares.



3. CICLO DE ALIMENTACION de la sanguijuela medicinal, donde alterna un período de hambre y otro de saciedad. La fase de hambre consta de dos subfases, la de apetito y la de ingestión. Durante la fase de apetito, nada hacia el origen de las ondas de oleaje. Cuando encuentra un hospedador de sangre caliente, se nutre del mismo durante media hora, hasta consumir una cantidad de sangre equivalente a nueve veces incluso su peso. Las sanguijuelas saciadas no muerden; evitan las superficies calientes y se esconden.



4. LA SEROTONINA provoca el destello luminoso de las neuronas de un ganglio del centro del cuerpo en esta micrografía de fluorescencia de una sanguijuela (*arriba*) tomada por uno de los autores (Lent). En medio se observan dos grandes células de Retzius. Cerca de los bordes aparecen dos pares de interneuronas laterales. La célula pequeña, bajo las células de Retzius, es una neurona posteromedial. Los ganglios anteriores contienen dos de esas interneuronas y un par adicional de interneuronas anteromediales, mientras que los ganglios caudales sólo presentan las células de Retzius y dos interneuronas laterales. Tales diferencias en el número de neuronas con serotonina explican que los niveles de serotonina sean más elevados en los segmentos anteriores y del centro del cuerpo, como indica la intensidad de la trama de color (*abajo*). Ello está de acuerdo con el papel que desempeña la serotonina en la alimentación, proceso controlado por la cabeza.




5. GANGLIO SUBESOFAGICO, que posee cuatro pares de células de Retzius en el centro y un par de grandes células laterales hacia la parte superior, teñidas de verde en la micrografía de fluorescencia (*izquierda*). Las neuronas que contienen el neurotransmisor dopamina aparecen de color azul. Cuando se tratan con 5,7-dihidroxitriptamina, una toxina, las neuronas dotadas de serotonina se tornan pardas y aparecen deformadas (*derecha*): la toxina agota la serotonina; pero no mata las células, pues las sanguijuelas tratadas con toxina, si bien no muerden aunque se encuentren hambrientas, se arrastran y nadan con normalidad.

Los impulsos llegaban al cuerpo, donde instaban la secreción de moco por parte de las glándulas de la piel. Extirpamos a continuación los ganglios, pero podíamos seguir provocando la secreción bañando la pared corporal en soluciones de serotonina.

En 1978, Adrian J. R. Mason y Lucy D. Leake, del Politécnico de Portsmouth, Inglaterra, demostraron que la serotonina de las células de Retzius relajaba también los músculos de la pared corporal y, consiguientemente, aumentaba la capacidad de distensión de ésta. Dos años más tarde, William B. Kristan, Jr., y Michael P. Nusbaum, de la Universidad de California en San Diego, encontraron que la serotonina de las interneuronas laterales se hallaba implicada en el desencadenamiento de las contracciones musculares ondulatorias que caracterizaban la natación de las sanguijuelas. Hace aproximadamente cinco años, Cameron G. Marshall estableció, en nuestro laboratorio, que la serotonina era el único neurotransmisor que estimulaba de modo fiable la secreción de saliva por las células de la glándula salivar.

Las neuronas con serotonina de la sanguijuela exhiben una característica relevante más. Estando Bryan M. Frazer y uno de nosotros (Lent) en la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, descubrimos que todas las neuronas con serotonina estaban acopladas entre sí por medio de sinapsis eléctricas; vimos también que algunas compartían entradas sinápticas de una misma fuente. Los interacoplamientos eléctricos mantenían las células en un nivel similar de excitabilidad y las sinapsis compartidas las excitaban o inhibían simultáneamente. Ambos tipos de uniones tendían a sincronizar el desencadenamiento de impulsos por esas neuronas, relacionadas entre sí por productos químicos.

Se esperaría que las neuronas sincronizadas desempeñaran alguna función coordinada; sin embargo, esas neuronas con serotonina conocen una curiosa diversidad de funciones. En particular, la relación entre serotonina, producción de saliva y natación llevó a plantearnos la siguiente cuestión: ¿Por qué nadan y producen saliva las sanguijuelas? Ambas actividades tienen que ver con la alimentación (las sanguijuelas nadan hacia sus presas y producen saliva mientras ingieren alimento); nos pareció obvia, pues, la hipótesis de que la serotonina estaba implicada en la alimentación. Diseñamos entonces una serie de experimentos para comprobar el papel que le corresponde a la serotonina en la fisiología y el comportamiento de alimentación de la sanguijuela. Habíamos llegado al punto decisivo de nuestra investigación.

En un primer conjunto de experimentos pretendimos averiguar qué efectos ejercía la serotonina sobre la conducta del individuo. Bañando las sanguijuelas en serotonina, el comportamiento de las hambrientas se acentuaba mucho: las sanguijuelas hambrientas iniciaban la natación hacia las ondas del oleaje en la mitad del tiempo que solían emplear y su frecuencia de mordedura aumentaba dos tercios. El baño en serotonina incrementaba también, en un tercio, el volumen de sangre ingerida, alcanzando la cantidad de alimento tomado ¡más de 10 veces el peso del cuerpo del animal! Y lo que era más importante: con serotonina, las sanguijuelas saciadas mordían, algo que no solían hacer nunca. En otras palabras, la serotonina modificaba la conducta de alimentación de la sanguijuela cualitativa y cuantitativamente.

Era el momento de investigar los efectos de la serotonina sobre los órganos directamente relacionados con la conducta de alimentación. Cuando inundamos con serotonina cabezas de sanguijuela parcialmente disecadas, observamos que las mandíbulas realizaban movimientos de mordedura, se segregaba saliva y la faringe se contraía rítmicamente. La serotonina seguía evocando esas tres respuestas incluso después de que hubiéramos extirpado los ganglios y los conectores, señal de que el neurotransmisor actuaba directamente sobre tales órganos. Encontramos, además, que cuando se caldeaban los labios de las cabezas de las sanguijuelas entre tres y cinco grados Celsius se obtenían las mismas respuestas, pero sólo si permanecía intacto el sistema nervioso.

Antes de atribuir esas funciones a las neuronas con serotonina, debía demostrarse que sus impulsos eran necesarios y suficientes para provocar las respuestas fisiológicas de alimentación. Para someter a prueba el primer requisito, preparamos cabezas de sanguijuelas de tal modo que las células de Retzius anteriores y las grandes células laterales se sometieran a la acción de microelectrodos. Observamos que la estimulación de las grandes células laterales con frecuencias bajas instaba la contracción de la faringe y que, con frecuencias mayores, se desencadenaba el bombeo rítmico. La estimulación de las células de Retzius aumentaba la producción de saliva y, a frecuencias superiores, se contraían los músculos de las mandíbulas. Por tanto, la descarga inducida de las neuronas efectoras de la serotonina desencadenaba las mismas respuestas de alimentación que la exposición a la serotonina misma.

Para demostrar que esas células re-

sultan necesarias en las respuestas relacionadas con la alimentación, debíamos hallar el modo de eliminar las neuronas efectoras del circuito de conducta. Optamos por inyectar en las sanguijuelas la 5,7-dihidroxitriptamina (5,7-DHT), neurotoxina que se acumula en el interior de las neuronas con serotonina, donde se oxida en una reacción que produce radicales libres y compuestos fenólicos pardos perjudiciales.

Inyectamos 5,7-DHT en sanguijuelas hambrientas que mordían. Cuando las examinamos días más tarde, nadaban y avanzaban normalmente, pero no mordían las superficies calientes. De hecho, actuaban como si estuvieran saciadas y apartaban rápidamente la cabeza. Sus células de Retzius y las grandes células laterales, de un color pardusco, presentaban formas irregulares. Es más, los niveles de serotonina de las células de Retzius pardas se habían reducido en más del 90 por ciento.

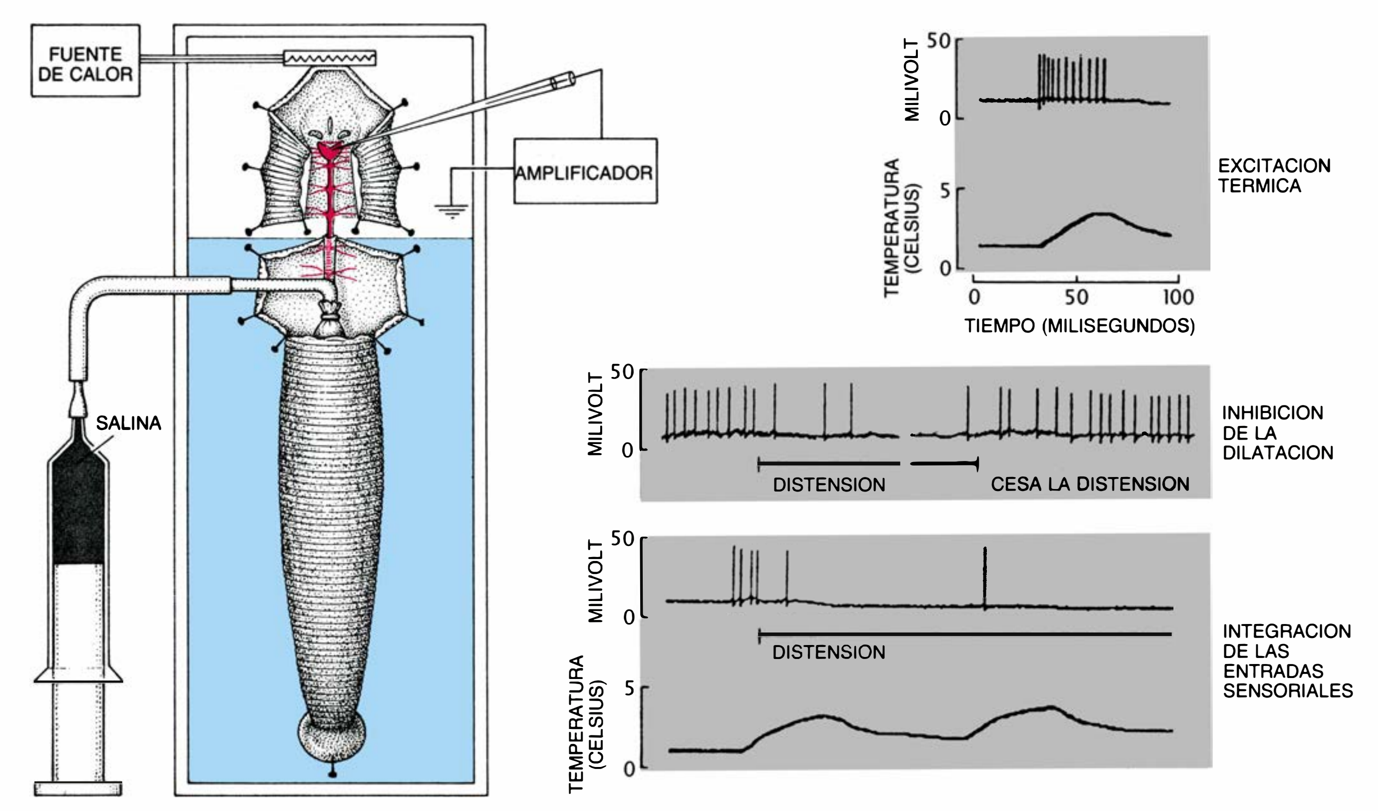
Para examinar los efectos precisos de la toxina sobre células aisladas insertamos microelectrodos en neuronas sensoriales y motoras específicas; comprobamos que presentaban impulsos y potenciales sinápticos normales. Pensamos que la toxina había destruido las neuronas con serotonina y, cuando volvimos a las células de Retzius y a las grandes células laterales, encontramos, atónitos, que descargaban potenciales de acción. En una observación más detallada encontramos que sus receptores de membrana, entradas sinápticas y axones periféricos también aparecían normales.

Se diría que la 5,7-DHT no mataba las neuronas, sino que sólo reducía su contenido de serotonina: la toxina inducía una lesión neuroquímica precisa. Razonamos que si la toxina detenía la conducta de alimentación por agotamiento de la serotonina, la reposición del neurotransmisor debería invertir el efecto conductual de la toxina. En efecto, al bañar en serotonina las sanguijuelas tratadas con toxina, volvían a morder cuando se les ofrecía una superficie caliente.

Seguidamente examinamos preparaciones disecadas de animales tratados con toxina. Encontramos que ni el caldeamiento de los labios ni el estímulo eléctrico de alta frecuencia de las células de Retzius o las grandes células laterales desencadenaban el movimiento mandibular, la producción de saliva o el bombeo. Cuando las preparaciones se sumergían en serotonina, reaparecían las tres respuestas fisiológicas. Podemos concluir, por consiguiente, que las grandes neuronas efectoras que contienen serotonina resultan necesarias para la expresión de la conducta de alimentación de la sanguijuela.

Estos experimentos establecieron el papel capital que desempeña la serotonina neuronal en la generación de la conducta de alimentación. Se deduce de ello que los estímulos que inician la alimentación, como el calor, deben inducir la descarga de impulsos por parte de las neuronas con serotonina. Y, recíprocamente, los estímulos que suspenden la alimentación, como la distensión de la pared corporal, deben inhibir la actividad de esas células o interferir en su liberación de serotonina.

Estudiamos, en preparaciones casi intactas, los efectos del calor y la distensión de la pared corporal sobre las neuronas con serotonina. Encontramos que, cuando se calientan los labios, las células de Retzius y las grandes células laterales reciben una excitación sináptica y responden con impulsos de alta frecuencia. Más aún, la respuesta al calor es específica de los labios (no la presentan otras partes de la piel) y por norma el estímulo sólo afecta a las neuronas con serotonina. Al elevarse la temperatura de aquéllos, suele aumentar el ritmo de descarga de éstas. Por tanto, un estímulo que induce a las sanguijuelas a alimentarse insta también la descarga de impulsos



6. LA APLICACION DE CALOR al labio de una sanguijuela parcialmente disecada insta una rápida respuesta de las grandes células laterales (*registro superior*). Se llenó el buche con salina y se vació luego. La distensión inhibía las grandes células laterales. Cuando se relajaba la distensión, las células recuperaban la excitación (*registro central*). Al aplicar a la vez distensión y calor, el efecto inhibidor de la distensión predominaba sobre el efecto del calor (*abajo*).

de alta frecuencia de sus neuronas con serotonina.

Para comprobar los efectos de la distensión, llenamos los buches de esas preparaciones con solución salina. Las células de Retzius y las grandes células laterales se mantuvieron inhibidas mientras los buches permanecían distendidos; la actividad del impulso se reanudó tras eliminar la salina del buche. Concluimos que el estímulo (la distensión) que hacía dar por acabada la alimentación inhibía la descarga de impulsos y, consiguientemente, bloqueaba la liberación de serotonina de los terminales axónicos. Más. Las células integraban sus entradas sinápticas de tal modo que el efecto inhibidor de la distensión superaba el efecto excitador del calor. Por tanto, la sanguijuela no se alimentará cuando tenga el cuerpo distendido.

Todas las funciones que se le conocen a la serotonina en la sanguijuela se ajustan, por consiguiente, a un esquema en el que esa sustancia dirige la conducta de alimentación, desde la búsqueda de la presa hasta la ingestión de la sangre de la que se nutre. También hemos encontrado que el comportamiento afecta a los niveles de serotonina del sistema nervioso. Los ganglios de las sanguijuelas hambrientas tienen más serotonina que los de las saciadas. A la ingestión sigue un rápido descenso, del 25 al 30 por ciento, del contenido de serotonina de los ganglios anteriores, manteniéndose bajos los niveles mientras la pared corporal se encuentra distendida. Cuando se relaja la distensión, los niveles de serotonina empiezan a aumentar y la sanguijuela reinicia su conducta de alimentación.

Nos sorprendía que los comportamientos asociados al apetito, como el nadar hacia la presa, no agotaran los niveles de serotonina de las interneuronas implicadas en esas conductas. Kent T. Keyser, de Stony Brook, y Joyce Ono, de la City of Hope, en colaboración con uno de nosotros (Lent) encontraron que la concentración de serotonina en las interneuronas laterales superaba los 100 milimolar, lo que constituye uno de los mayores niveles de transmisor encontrados jamás en neurona alguna. Esa elevada presencia quizá impida el agotamiento de la serotonina durante los repetidos intentos del organismo hambriento de encontrar alimento.

En contraste con las interneuronas, las células de Retzius y las grandes células laterales están relacionadas principalmente con la ingestión: bombeo faríngeo, mordedura, producción de saliva, capacidad de dilatar la pared corporal y producir moco (lo que, según se ha comprobado, ayuda al animal a sujetarse a la presa). La ingestión va agotando la serotonina de los ganglios a medida que la sanguijuela pasa del hambre a la saciedad. Sospechamos que la excitación prolongada de esas células durante la ingestión debe activar el transporte de serotonina por los axones, agotándose la serotonina de las células.

Un solo neurotransmisor expresa la conducta de alimentación en las sanguijuelas: excita las células nerviosas y órganos pertinentes que, conjuntamente, desencadenan un comportamiento complejo del organismo entero. Sólo están implicadas unas pocas neuronas —notable ejemplo de economía neuronal que permite a estos animales, que únicamente poseen 400 neuronas por ganglio, cazar y hacer presa en mamíferos. Es llamativo que en especies de sanguijuelas lejanamente emparentadas y que se alimentan por medio de una trompa y no por mandíbulas, los músculos de la ingestión y las glándulas salivares están también controlados por neuronas efectoras de la serotonina. En efecto, la función conductual de la serotonina quizá trascienda el dominio de las sanguijuelas: la serotonina provoca la salivación, mordedura y contracción faríngea de animales de otros tres *phyla*: nemátodos, moluscos e insectos. El hallazgo de que esas neuronas (químicamente relacionadas entre sí) desempeñan un evidente papel conductual en la sanguijuela podría ayudar a interpretar las pautas de la evolución de metabolitos neuroquímicos implicados en el comportamiento.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FEEDING BEHAVIOR OF THE MEDICINAL LEECH, *HIRUDO MEDICINALIS*. L. Michael H. Dickinson y Charles M. Lent en *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 154, nº 4, págs. 449-455; 1984.

SEROTONIN INTEGRATES THE FEEDING BEHAVIOR OF THE MEDICINAL LEECH. Charles M. Lent y Michael H. Dickinson en *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 154, nº 4, págs. 457-471; 1984.

LEECH BIOLOGY AND BEHAVIOR. Roy T. Sawyer. Oxford University Press, 1986.

ON THE TERMINATION OF INGESTIVE BEHAVIOR BY THE MEDICINAL LEECH. C. M. Lent y M. H. Dickinson en *The Journal of Experimental Biology*, vol. 131, nº 1, págs. 1-15; septiembre de 1987.

Metalurgia temprana de hierro en Africa central

Hace más de 2500 años, los pobladores de las proximidades del lago Victoria comenzaron a fundir hierro en hornos de notable capacidad calorífica. Se han desentrañado los mecanismos de esa antigua técnica

Francis Van Noten y Jan Raymaeckers

A principios de la década de 1950, miembros de la tribu balaúnde, de la zona meridional del Zaire, realizaron un curioso descubrimiento cuando, en las proximidades de su aldea, excavaban para extraer arena. Hallaron un conjunto de objetos de arcilla que parecían toscos ladrillos, muchos de los cuales estaban decorados con impresiones circulares o lineales. Dos miembros del Instituto de Investigaciones Científicas de Africa Central, Jean Hiernaux y Emma Maquet, fueron llamados para que examinaran el material. Su excavación demostró que los ladrillos habían formado parte de un alto horno dedicado a la fundición de hierro. Cuando se les expuso esa interpretación a los balaúndes, no acertaron a ver ninguna conexión entre los hornos y su propia cultura. Se inclinaron a pensar que los hornos habían sido construidos por gentes con una técnica de fundición de hierro más refinada que la suya propia.

Los balaúnde estaban en lo cierto. Por descubrimientos de la última década sabemos que los altos hornos representan una destacable tecnología de la Edad de Hierro temprana, que se extendió por la región interlacustre de Africa central (que comprende Zaire oriental, Ruanda, Burundi, Tanzania septentrional, Kenia sudoccidental y Uganda). Valiéndose únicamente de materiales simples, los metalúrgicos de la Edad de Hierro creaban temperaturas de hasta 1400 grados Celsius, medio eficaz de obtener hierro a partir de su mineral. La tecnología de fundición no sólo resultó rentable, sino que perduró también: apareció en la región interlacustre en el primer milenio a. de C. y persistió en numerosos puntos hasta comienzos del siglo XX. Sus orígenes permanecen oscuros, pero las excavaciones sistemáticas, combinadas con estudios etnográficos, empiezan a ofrecer un detallado cuadro del funcionamiendo de los hornos.

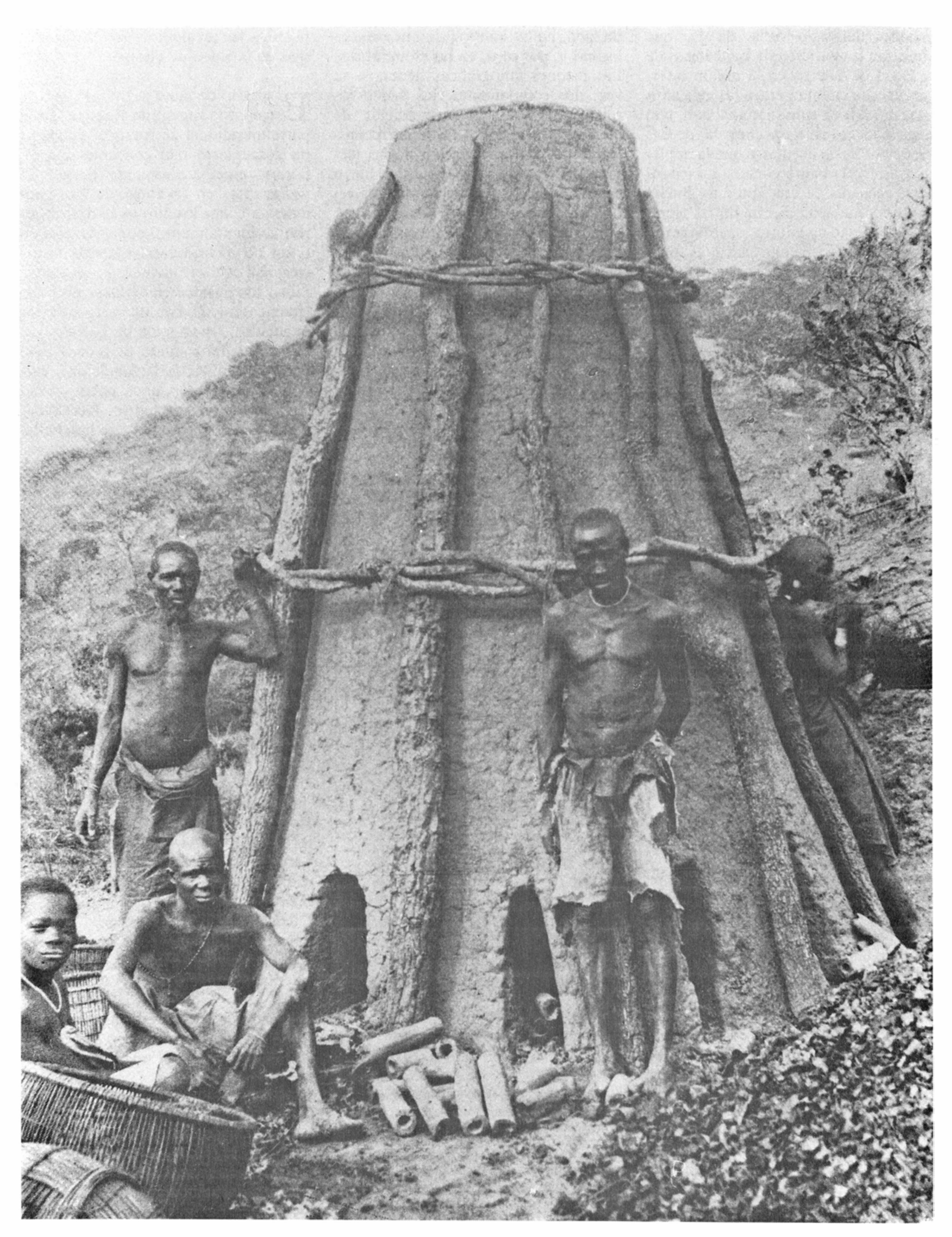
Los habitantes de la región interlacustre (que se extiende entre el lago Victoria y una cadena de lagunas) descienden de inmigrantes que hablaban lenguas de la familia bantú. Los emigrantes de lengua bantú procedían de la zona denominada Las Praderas, en el actual Camerún. Hace miles de años, comenzaron a avanzar hacia el sur, hasta ocupar un territorio que se extiende desde el sur de Africa hasta Camerún y Kenia, y en el que se hablan unas 650 lenguas de la familia bantú. Nuestro trabajo se ciñe a la región interlacustre, donde recientes estudios señalan una sorprendente uniformidad de las técnicas de la Edad de Hierro temprana.

La uniformidad presenta, a la vez, carácter espacial y temporal. En el primero, los más recientes descubrimientos muestran que la Edad de Hierro temprana resultó muy homogénea en toda la región interlacustre. Lo que es más, el momento de aparición de la tecnología de la Edad de Hierro es muy similar en las áreas estudiadas hasta ahora. Cuando Hiernaux y Maquet realizaron su primera excavación, las técnicas de datación de radiocarbono no habían alcanzado aún un uso generalizado; y así, aquellos primeros hallazgos no recibieron una datación correcta. Sin embargo, conforme los métodos del radiocarbono fueron aplicándose con más frecuencia, se fecharon una serie de lugares de Ruanda, Burundi, Uganda, Sudán, Kenia, Zaire y Tanzania, y se evidenció que, en todos ellos, los métodos de la Edad de Hierro temprana habían aparecido alrededor del siglo VII a. de C.

La cultura de la Edad de Hierro temprana de la región no sólo se caracteriza por las técnicas de fabricación de hierro, sino también por un tipo específico de cerámica que casi siempre aparece ligada a él. Uno de nosotros (Van Noten) acuñó la expresión Complejo Industrial de la Edad de Hierro temprana para designar la combinación de cerámica y métodos de fundición del hierro. Tras su aparición en el primer milenio a. de C., el complejo perduró más de 1000 años; alcanzó su apogeo en la primera mitad del primer milenio d. de C., siendo desplazado, en el siglo VIII, por las sociedades, más ricas y altamente estratificadas, de la Edad de Hierro tardía.

El complejo industrial, que representa el comienzo de la tecnología de la Edad de Hierro en la región interlacustre, ha planteado no pocos problemas a los prehistoriadores. En la década de 1960 se aceptaba mayoritariamente que la dispersión de los métodos de fabricación del hierro estuvo asociada a la migración, desde Las Praderas camerunenses, de las poblaciones que hablaban bantú. Sin embargo, las da-

FRANCIS VAN NOTEN y JAN RAYMAEKERS están profundamente interesados por los temas que conjugan la arqueología y la etnografía. Van Noten es jefe del departamento de arqueología general y antropología de los Reales Museos de Arte e Historia de Bruselas. Desde 1965 ha realizado trabajos de campo en Africa y en Bélgica. Raymaekers es investigador del Real Museo de Africa Central de Tervuren, Bélgica.



1. ALTO HORNO para la fundición de hierro construido por la tribu fipa, de Tanzania. La chimenea, que se erige sobre un gran pozo de hasta metro y medio de ancho y 75 centímetros de profundidad, se levantó con arcilla recubierta con un enlucido. El andamiaje sirve para verter el carbón vegetal y mineral de hierro. Los tubos de arcilla que aparecen en torno a la base son toberas; aportan oxígeno y facilitan la elevación de la temperatura. Este tipo de hornos comenzó a utilizarse en Africa central en el s. VII a. de C. y aún se empleaba en algunas zonas en 1914, cuando el etnógrafo R. P. Wyckaert tomó esta fotografía.

taciones del siglo VII a. de C., que anuncian la aparición de las técnicas de la Edad de Hierro en la región interlacustre, se cuentan entre las más antiguas del Africa subsahariana; son, con seguridad, tan antiguas como las de Las Praderas. Suele aceptarse que la población de habla bantú comenzó a extenderse más allá de Las Praderas mucho antes de que aparecieran allí las técnicas de la Edad de Hierro, que pudieron adquirirse en el camino hacia el sur o habrían surgido independientemente en la región interlacustre (lo que resulta menos plausible).

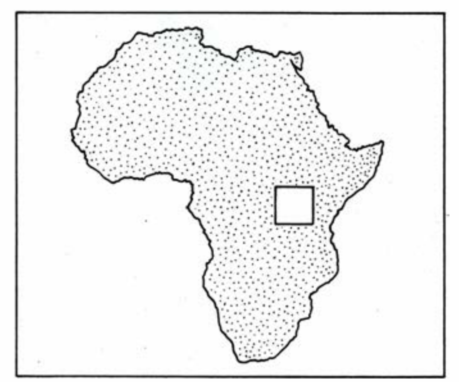
Aunque no dispongamos de una explicación detallada de sus orígenes, sí podemos emitir un juicio de la técnica en sí misma. Juicio que se apoya, por un lado, en las investigaciones arqueológicas y, por otro, en las etnográficas. Las razones etnográficas tienen, a su vez, dos componentes: los primitivos relatos etnográficos de fundición de hierro en la región y la "etnorreconstrucción", la reproducción de las técnicas originarias de la Edad de Hierro en colaboración con los habitantes actuales de la zona. Podía abordarse esa reconstrucción en Africa central porque las técnicas de la Edad de Hierro seguían practicándose en épocas que quedaban al alcance de la memoria de los lugareños más ancianos. En algunas partes de la región, esos recuerdos conservaban tal viveza que durante la Segunda Guerra Mundial, cuando escaseó el hierro importado, se pusieron en práctica las técnicas de fundición propias de la Edad de Hierro.

El grueso de nuestro trabajo se centró en la región de Kabuye, en la parte meridional de Ruanda, donde se ha descubierto una concentración de hornos espectacularmente densa: 23 yacimientos en un radio de tres kilómetros. Todos los hornos se descubrieron accidentalmente, por erosión o en obras de construcción. Durante la excavación de los restos casi siempre afloraban los mismos elementos: un pozo (frecuentemente con un cerco exterior quemado), fragmentos de ladrillo, tubos de arcilla a modo de toberas, escorias (residuos de la fundición), carbón vegetal y, en unos pocos casos, algo de mineral de hierro. Ocasionalmente, en el propio pozo se han hallado fragmentos de cerámica del estilo típico de la Edad de Hierro.

El primer paso de la fundición del hierro consiste, por supuesto, en obtener una cantidad suficiente de la materia prima necesaria: hematites, o mena de hierro. La hematites contiene hierro en forma de óxido (Fe_2O_3), que aparece cristalizado o bajo una forma terrosa rojiza. En la región interlacustre, en algunas laderas la hematites aparece en bloques, por lo que en la Edad de Hierro temprana la captación del mineral debió limitarse a la recogida y excavación superficiales; hay pocos indicios de minería. También muchos toponímicos atestiguan la presencia del mineral en Ruanda; la ciudad más importante de las proximidades de las colinas Kabuye se llama tanto Butare como Ubutare, que, en la lengua local, el kinyaruanda significan "piedra" y "piedra de hierro", respectivamente.

Una vez reunido el material, se prepara para la fundición. Uno de nosotros (Van Noten) observó en los años setenta la preparación del mineral durante una etnorreconstrucción de la fundición de hierro entre los madi, de la región septentrional del Zaire. Durante media hora, el mineral se precalentaba a fuego vivo. Los madi daban varias razones para hacerlo así. Una era que, calentando la hematites, resultaba más fácil separar el mineral de hierro del resto de los materiales asociados. Otra razón: el calor tornaba quebradizo el mineral, que así podía fragmentarse en pequeños trozos, más fáciles de fundir. Sin embargo, los pedazos no podían ser demasiado pequeños, porque ahogarían el fuego del horno, de ahí que se cribara el mineral





2. REGION INTERLACUSTRE de Africa central. Se extiende entre el lago Victoria y una cadena de lagunas. El trabajo de los autores y otros investigadores demuestra que, durante la Edad de Hierro temprana, en esa zona se registró una sorprendente uniformidad técnica basada en los altos hornos como herramienta metalúrgica. Urewe es el yacimiento donde por vez primera se encontró cerámica de la Edad de Hierro temprana. En el de Bishange se recuperaron los primeros restos de un alto horno. En las colinas próximas a Kabuye se hallaron 23 yacimientos con hornos. La región de Buhaya ha proporcionado alguno de los elementos más antiguos relacionadas con la metalurgia del hierro en la región.

fragmentado para separar del polvo los trozos pequeños.

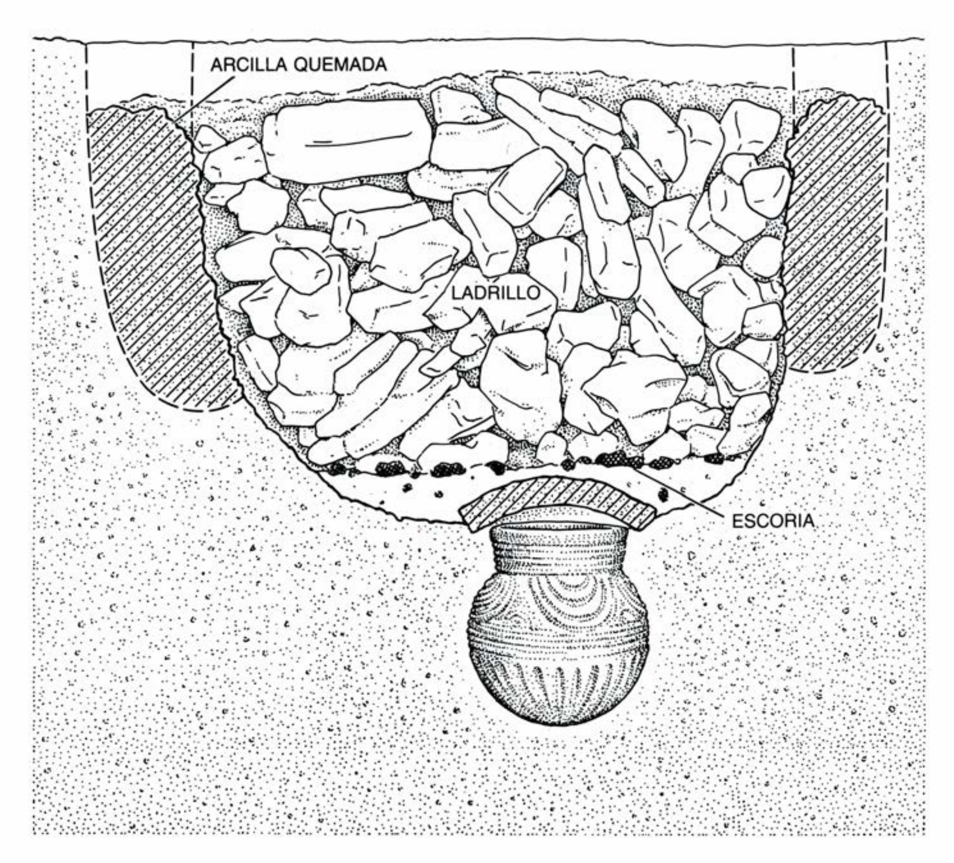
Los trabajos preparatorios de la fundición no se limitaban al tratamiento previo del mineral. En el horno se empleaba carbón vegetal como combustible, obtenido de árboles seleccionados para ese propósito. Análisis microscópicos de los fragmentos de carbón vegetal hallados en la base de hornos de la Edad de Hierro temprana ponen de manifiesto que los metalúrgicos escogían sus árboles con cuidado. Preferían árboles que, como el espino (*Zizyphus sp.*), tiene madera compacta y un alto componente de sílice, por lo que arden lentamente. El carbón vegetal hallado en los hornos demuestra también que las gentes de la Edad de Hierro temprana obtenían la madera de su inmediato alrededor, la sabana herbácea, sin desplazarse a los frondosos bosques de las montañas que se encontraban a cierta distancia.

La fundición consumía bastante cantidad de madera. Hasta el punto de que la demanda de madera pudo acabar alterando el entorno donde vivían los metalúrgicos. En 1978 se realizó un ensayo de fundición cerca de la ciudad de Gisagara, en la región de Kabuye. En una sola operación del pequeño horno experimental se consumieron unos 95 kilogramos de carbón vegetal. Para producir tal cantidad de carbón hubo que talar quince árboles de entre 14 y 16 centímetros de diámetro. El ejemplo no deja lugar a dudas de que el consumo de madera para la fundición (sumado a la ganadería y la agricultura), sostenido durante un período de varios siglos, pudo provocar la deforestación. Esta, a su vez, terminaría haciendo imposible la metalurgia, lo que explicaría la ausencia de hornos en Kabuye con posterioridad al 500 d. de C.: quizá se abandonó la región al agotarse los árboles.

Sea como fuere, se conocen bien, por referencias históricas y por etnorreconstrucciones, los procedimientos empleados para preparar el carbón vegetal. En Ruanda, el método tradicional comenzaba con la excavación de un pozo de uno o dos metros de anchura por 60 u 80 centímetros de profundidad. Seguidamente, se quemaban hierbas y ramas para formar una capa de ceniza caliente, que se cubría con leña de mediano grosor. Se recubría todo con una capa de hierbas húmedas u hojas y se dejaba consumir lentamente. El carbón vegetal que, por su lenta y cuidada ignición, conserva la forma ori-



3. RESTOS DE LA CAVIDAD situada debajo de la chimenea de un alto horno, descubiertos en el yacimiento Kabuye IV. El hueco mediría unos 70 centímetros de diámetro. (Cada división de la flecha corresponde a 10 centímetros de longitud.) Los fragmentos interiores son restos de los ladrillos que conformaban la chimenea y las toberas que aportaban oxígeno. El promedio de vida de un alto horno dependía de su tipología.



4. SECCION TRANSVERSAL de la cavidad correspondiente al yacimiento Kabuye II. La arcilla quemada, que se muestra a la derecha y a la izquierda de la cavidad, constituye los cimientos de las paredes de la chimenea. La escoria es el residuo del proceso de fundición. El cuenco situado debajo del fondo de la cavidad contiene materiales a los que se daba algún significado mágico relacionado con el proceso de fundición.



ginal de las ramas, queda listo en unas 24 horas.

Probablemente, el horno se iba poniendo a punto mientras se hacía el carbón vegetal. En la región interlacustre se conocen dos tipos de hornos. El primero, lo sabemos por descripciones etnográficas, consistía en una sencilla cavidad practicada en el suelo. El segundo tipo presentaba un esbelto conducto erigido sobre el pozo, donde se alojaba el carbón vegetal y el mineral. Se poseen también datos etnográficos de estos hornos altos. Se lee en ellos que los dos tipos se disponían uno al lado del otro: el alto servía para la fundición inicial, mientras que el bajo se utilizaba para refinar el producto obtenido en el anterior. Sin embargo, en el registro arqueológico de la Edad de Hierro temprana de la región interlacustre únicamente se encuentran restos de altos hornos, y en ellos nos vamos a centrar aquí.

El primer paso en la construcción de un alto horno consistía en excavar el pozo. No resulta fácil señalar con precisión las proporciones del mismo, porque en muchas ocasiones la erosión del suelo y la ocupación humana han destruido la boca. De los hornos que han conservado el cerco quemado se infiere que, en ocasiones, el diámetro alcanzaba los 1,4 metros y, la profundidad, unos 75 centímetros. La parte inferior y las paredes de la cavidad recibían a veces tratamiento, que en algunos casos consistía en su recubrimiento con una fina capa de arcilla. Al menos uno de los hornos de Kabuye (el Kabuye I) se bordeó con estacas de madera.

Tales elementos desempeñaban, sin duda, una función práctica, pero en numerosas áreas se han encontrado, en la parte inferior del pozo, objetos sin función clara. En Buhaya, al noroeste de Tanzania, se trataba de una pieza de hierro fundido, que se había colocado, bajo una piedra de arenisca que lo cubría, en un pequeño agujero del fondo de la cavidad. En Bishange, Kivu (Zaire oriental), Hiernaux y Maquet encontraron fragmentos de cerámica en el centro de la cavidad. Los supusieron restos de un cuenco destinado a recoger el hierro fundido en la parte inferior del horno. Sin embargo, como veremos, el proceso de fundición de los altos hornos de la Edad de Hierro temprana no resultaba compatible con esa función.

Las muestras más espectaculares de esos elementos no funcionales han aparecido en Ruanda. En los yacimientos de Kabuye I y Mutwarubona II se enterraron, en el punto más bajo de la cavidad, sendos pequeños recipientes con su tapa. Ambos objetos resultan atípicos desde el punto de vista arqueológico: se apartan de la cerámica funcional que suele encontrarse asociada a los hornos. Su forma anómala parece indicar que se fabricaron especialmente para la fundición; quizá no los crearan los ceramistas que hacían la cerámica común. En tiempos históricos, en la región interlacustre la cerámica la fabricaban las mujeres, mientras que la fundición la realizaban los varones. Quizá, como parte de una preparación ritual para la fundición, esos recipientes especiales fueron obra de los fundidores.

Lo observado en la etnorreconstrucción realizada entre los madi de Zaire corroboró la existencia de preparaciones rituales. Se había pedido a los madi que llevaran a cabo todas las operaciones de fundición en presencia de los investigadores, pero excavaron y prepararon el hoyo antes de llegar los espectadores. Debajo de la base de la cavidad habían excavado y rellenado un agujero; ante nuestra insistencia lo abrieron, descubriéndose una estaca vertical y trozos cuidadosamente cortados de diferentes tipos de madera. El conjunto estaba coronado con una guirnalda de lianas y un objeto construido con tres estacas. Todo ello se había cubierto con hojas y otras dos piezas de madera y luego enterrado. No se nos permitió excavar ese material después del experimento de la fundición, claro indicio de que los objetos enterrados tenían un significado mágico.

En un terreno más práctico, una vez terminada la cavidad quizá se rellenara con tallos de papiro y hierbas. Los tallos seguramente no servían como combustible, pues la escoria encontrada en hornos antiguos contenía restos de tallos no incinerados e incluso follaje fresco. No se entiende bien la función de las hierbas: podrían separar el hierro de la escoria, reteniendo el hierro y dejando colar entre ellas la escoria derretida. Muchos altos hornos se sirven de tal método de separación; en los bajos construidos por los madi de forma experimental, la escoria iba a parar a un pozo abierto bajo la cavidad y allí se recogía. Si la escoria se separaba del hierro fundido por medio de las hierbas, la cerámica encontrada bajo la cavidad de los altos hornos no podía servir para recogerlo, porque el hierro se queda en la parte alta del horno y nunca fluye hasta abajo.

Excavado ya el agujero, llegaba el momento de preparar la arcilla para la construcción de la chimenea. La utilizada en Ruanda durante la Edad de Hierro temprana contenía gran cantidad de cuarzo, mica y feldespato, minerales que ayudaban a desgrasar la arcilla, confiriéndole la dureza necesaria para soportar las elevadas temperaturas del horno. Una buena fuente de arcilla rica en minerales son los hormigueros y, en efecto, algunos etnógrafos han descrito la extracción de arcilla de los hormigueros, que luego se amasa, se seca y se muele para utilizarla a continuación. Preparada así la arcilla, en ocasiones se le añaden otros materiales, como trozos de cacharros rotos, que actúan de desgrasantes adicionales. Puede entonces empezar la construcción de la chimenea.

Para crear el ambiente idóneo para el proceso de fundición, las paredes del conducto deben constituir excelentes aislantes. Y ello porque la fundición no sólo consiste en separar la escoria del hierro, sino también en reducir químicamente el hierro desde su forma oxidada a hierro metálico (Fe). Semejante reducción exige mantener lo más baja posible la presencia del oxígeno atmosférico; esa es una de las funciones que realizan las paredes del alto horno. De las excavaciones de la región interlacustre se desprende que se creaba la atmósfera reductora mediante una técnica de construcción basada en una combinación de ladrillos y largas espirales de arcilla, a modo de sogas.

Según parece, los ladrillos, secados al sol, formaban la parte inferior de la chimenea. Colocados de ese modo, formarían una estructura capaz de dilatarse y contraerse sin romperse, mejor que las construidas con espirales de arcilla; la flexibilidad adquiere importancia decisiva en la base de la chimenea, donde se alcanzan las temperaturas más elevadas. No parece que los ladrillos, que constituían una sólida cimentación para la parte superior de la chi-

5. SEIS PASOS DEL TRATAMIENTO DEL HIERRO realizado por los madi, del norte del Zaire. Encendido del fuego (*arriba, a la izquierda*). El tubo de arcilla con forma de embudo es una tobera. El fuego ha prendido bien (*arriba, a la derecha*). La escoria fluye de la cavidad hacia un pozo inferior (*centro, a la izquierda*). La fundición ha concluido: se retira la tobera y aparece el hierro en forma de bloque esponjoso (*centro, a la derecha*). Se retiran del horno los fragmentos de hierro, que no llega a fundirse, (*abajo, a la izquierda*). Se recalienta el hierro y se golpea con un martillo para expulsar el carbón vegetal y la suciedad.

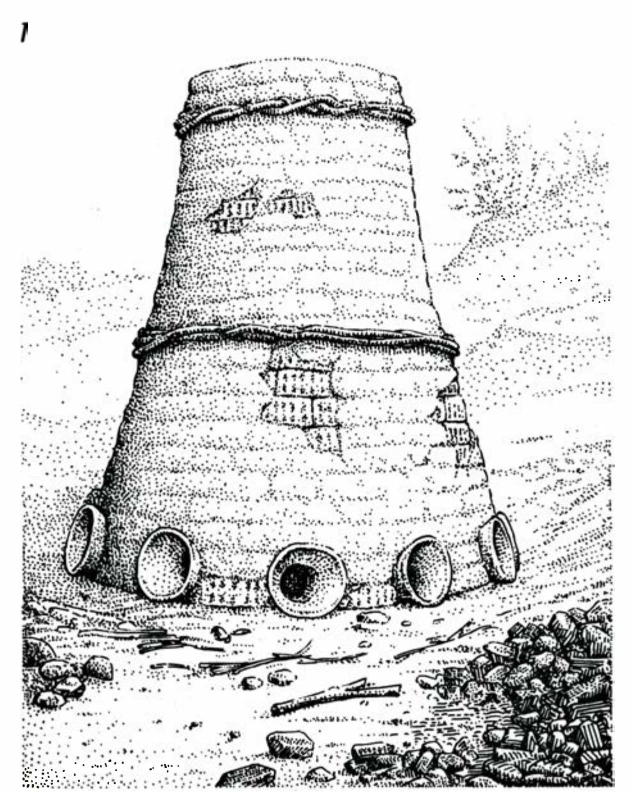
menea, se sometieran a cocción previa. Antes bien, dan la impresión de haber sido secados al sol y colocados con posterioridad en las paredes de la chimenea, donde se cocerían durante la fundición. Análisis paleomagnéticos —basados en la observación de que, cuando la arcilla se somete a altas temperaturas, se derrite parcialmente y los cristales minerales que contiene se alinean según el campo magnético predominante— demuestran que algunos ladrillos se recocieron varias veces, señal de que se tomaron de hornos que habían funcionado bien y se reutilizaron posteriormente.

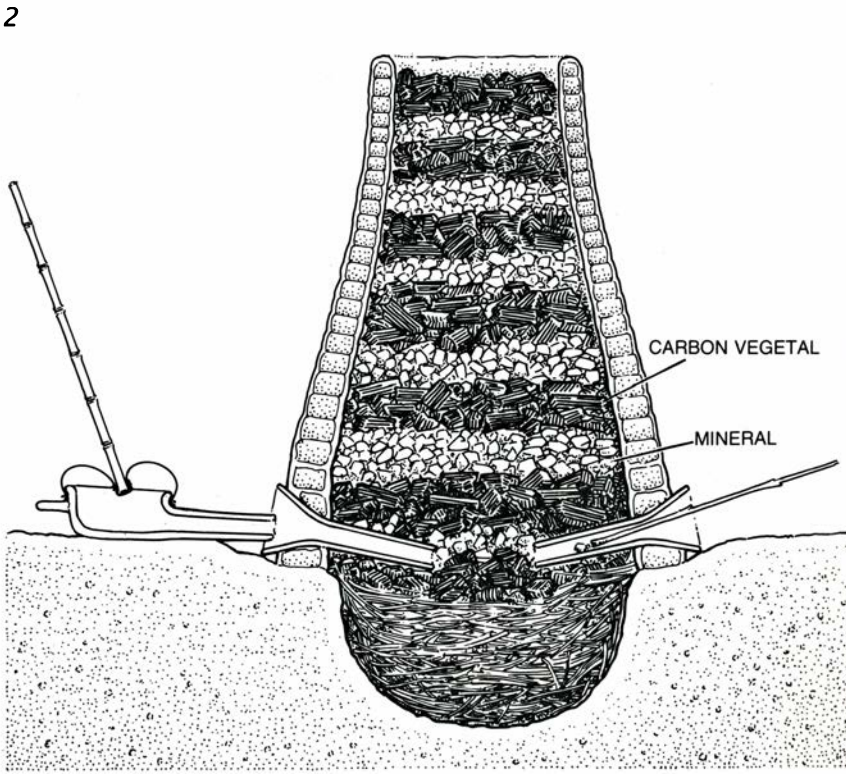
La parte alta de la pared se levantaba mediante una técnica análoga a la de los métodos de "construcción en espiral", de remoto origen y que aún se utilizan en la fabricación de recipientes de cerámica. En alfarería se parte de un disco de arcilla húmeda; se moldea la arcilla restante en una larga y delgada tira redonda, que va añadiéndose en rotación y se sujeta en su lugar conforme crecen las paredes del cuenco. Cuando el recipiente está acabado, las caras interior y exterior de la pared se alisan y se decoran. En una escala considerablemente mayor (las chimeneas más esbeltas superan los tres metros de altura), ese mismo método de adición en espiral se empleaba para levantar los altos hornos destinados a la fundición del hierro.

Los análisis arqueológicos han proporcionado abundante información sobre el procedimiento empleado en la realidad para ir añadiendo las espirales. Las capas sucesivas no se adherían, como hubiera ocurrido de haberse colocado estando húmedas. La construcción debió ser, por tanto, un proceso gradual, en el que se dejaba secar ligeramente cada sección de espiral antes de colocar la siguiente. Parece que los constructores trabajaban principalmente en sentido contrario al de las agujas del reloj. Cada vez que se añadía una sección, se apretaba en su sitio con los dedos, lo que dejaba las marcas de los dedos en la arcilla fresca. Algunos arqueólogos han visto en esos dibujos motivos decorativos, pero nosotros creemos que son mera consecuencia de la técnica utilizada para construir la chimenea. En apoyo de nuestra interpretación está el hecho de que, una vez concluida la chimenea, se revocaba tanto por dentro como por fuera, lo que habría ocultado cualquier "decoración" impresa en las espirales.

El revocado consolidaba la pared y aumentaba su capacidad de aislamiento, favoreciéndose de ese modo el mantenimiento de la atmósfera reductora en el interior. Más aún, un nuevo enlucido permitiría preparar el horno para otra combustión, o renovarlo si había caído en desuso. Así ocurrió en Zambia durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se cortaron las importaciones de hierro. Para compensar la falta de importaciones, los lungu revocaron sus hornos y volvieron a fundir metal con las técnicas de la Edad de Hierro.

El promedio de vida de un horno dependía de su tipología. Los bajos sólo podían utilizarse una vez, pues había que desmantelarlos para recoger el hierro. Los altos, sin embargo, representaban una mayor inversión de trabajo. Los altos hornos usados hasta época reciente por los fipa de Tanzania se elevaban hasta dos o tres metros de altura. Los construidos durante la Edad de Hierro temprana probablemente midieran dos metros o algo más. Hubiera resultado despilfarrador reconstruir estructuras de tales características tras cada hornada; en efecto, con toda verosimilitud los hornos se utilizaban durante varios años. Con plantas trepadoras y largos palos se formaba un andamiaje que contribuía a mantenerlo sujeto, a la vez que brindaba una plataforma desde donde llenarlo. Las grandes planchas de arcilla quemada halladas entre los restos de los hornos






6. FUNDICION EN ALTOS HORNOS de la Edad de Hierro temprana, según la han reconstruido los autores. Se revocaba la chimenea, para asegurar el mantenimiento de una atmósfera reductora en el interior, y se rodeaba con ramas, para reforzarla (*1*); las toberas se disponían radialmente en torno a la base. Se

podrían ser puertas para retirar el hierro fundido sin desmantelar el horno.

La necesidad de mantener una atmósfera reductora explica en parte la forma de los hornos: cargando con mineral y carbón vegetal la larga y estrecha chimenea se ocupaba todo el espacio y se reducía al mínimo la cantidad de oxígeno del interior. Sin embargo, la combustión precisaba oxígeno, por lo que debía encontrarse un medio que lo aportara cuando se precisara, pero sin extenderlo por toda la estructura. El método más simple consiste en abrir agujeros en la base, para que pase aire a su través, pero también puede inducirse el tiro artificialmente. La más reciente investigación arqueológica indica que en los altos hornos se empleaba el tiro inducido.

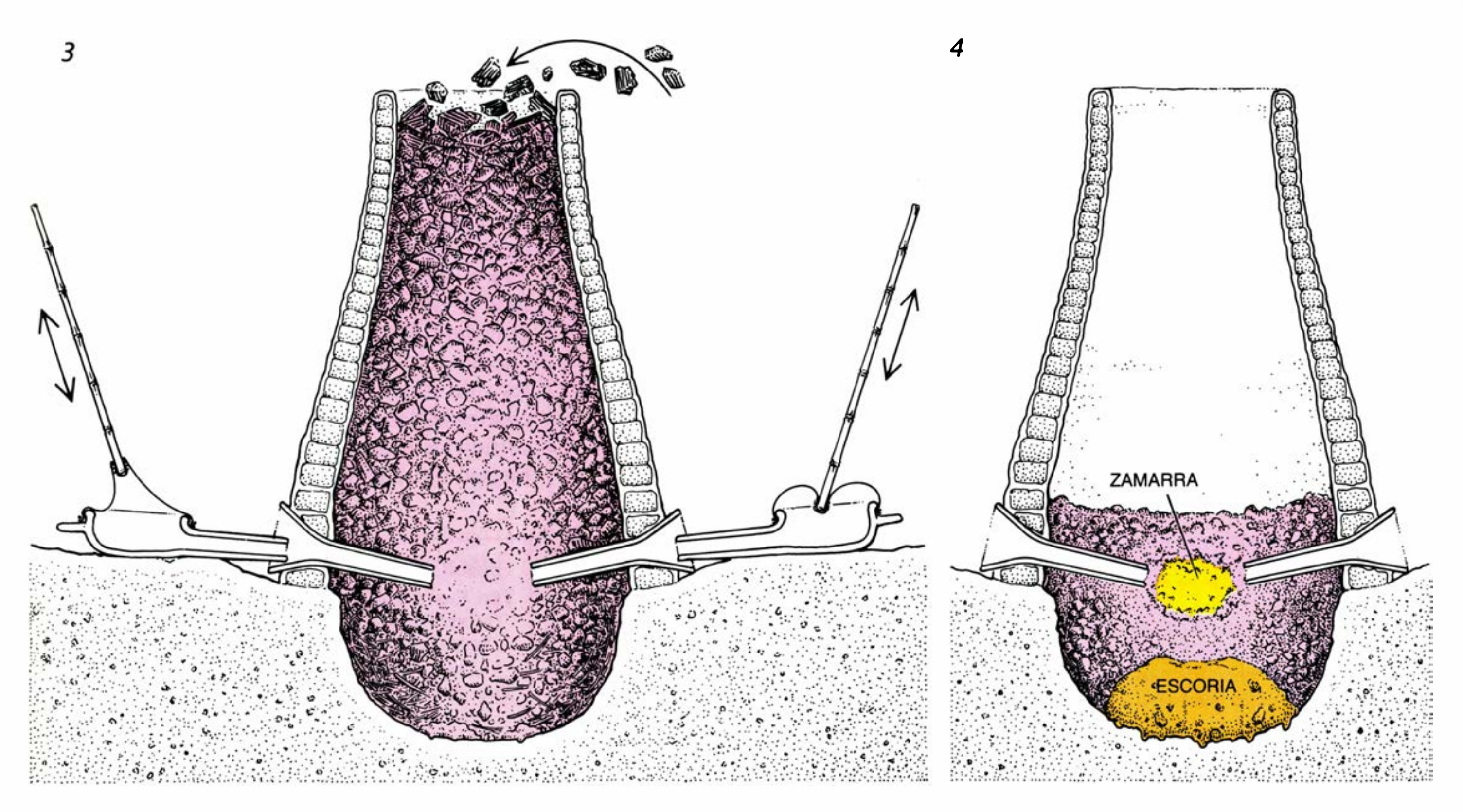
En ese sistema de ventilación resultan decisivas las toberas. Se conocen esos tubos de arcilla por descripciones etnográficas, así como por excavaciones arqueológicas. Según los informes etnográficos, parece que todas las toberas se fabricaban de modo similar. La arcilla, cuidadosamente preparada, se prensaba alrededor de un palo de madera; después de secarse ligeramente, se retiraba el palo, quedando un tubo hueco. Los tubos de arcilla se insertaban en la base del horno, a veces empalmados en serie. Para facilitar la entrada de aire, a la terminación exterior del tubo podía dársele forma de embudo. En la pared de un horno excavado en Gisagara se descubrió esa pieza terminal en forma de embudo, lo que vino a reforzar la hipótesis de que en los hornos de la Edad de Hierro se aplicaba el tiro inducido.

Es bastante probable que en los extremos abiertos de las toberas se insertaran fuelles. No se ha encontrado todavía ningún fuelle en contextos arqueológicos, pero las descripciones etnográficas regionales ofrecen abundantes testimonios de ellos. Los fuelles que se emplean en la actualidad están formados por un amplio cuenco, de arcilla o tallado en madera, con un mango hueco. La boca abierta del recipiente se cubre con piel de animal, que en ocasiones va sujeta a un palo. El movimiento vertical del palo inyecta aire desde el fuelle, a través de las toberas, hasta el centro del horno.

Concluidos los preparativos, el horno quedaba listo para cargarlo. Al empezar la carga, las paredes de la chimenea debían encontrarse ya muy endurecidas, porque no se han hallado fragmentos de carbón vegetal o mineral adheridos a los ladrillos. El procedimiento consistía en introducir carbón vegetal y mineral en la chimenea, probablemente en capas alternativas que llenaban más o menos la alta estructura. Puesto que no existen grandes aberturas en la sección inferior del horno, la carga de carbón vegetal y mineral debía realizarse desde arriba, con ayuda de algún andamiaje.

Se encendía entonces el horno, por medio de un trozo de carbón incandescente que se introducía por una tobera hasta el centro de la base del horno. En cuanto empezaba a avivarse el fuego, se ponía en marcha la fundición, cuyo proceso comprendía dos partes: la reducción del óxido de hierro a hierro metálico y la separación del hierro de los minerales asociados, que fluyen en forma de escoria. Químicamente, la reducción comienza antes. El oxígeno, introducido por las toberas, se combina con el carbono del carbón vegetal y produce monóxido de carbono (CO); ese monóxido de carbono es precisamente el que extrae el oxígeno del óxido de hierro, formándose dióxido de carbono (CO_2), que se libera por la chimenea, y hierro. La reducción comienza a la temperatura de unos 800 grados Celsius.

El segundo paso, la separación de la escoria, comienza alrededor de los 1150 grados Celsius; a partir de esa temperatura se licúan los minerales no



rellenaba la chimenea con capas de carbón vegetal y mineral de hierro (*2*); se introducían fuelles en las bocas de las toberas, para reforzar la ventilación; se encendía el fuego con un carbón incandescente y desde arriba se añadía carbón vegetal (*3*). El producto era una "zamarra" esponjosa de hierro y escoria (*4*).

deseados. El punto de fusión del hierro se sitúa en torno a los 1540 grados. Puesto que no tenía interés fundirlo, los metalúrgicos tuvieron que ingeniárselas para mantener la temperatura de trabajo del horno entre 1150 y 1540 grados –temperaturas notables a tenor de los materiales empleados. El producto de la reducción era una "zamarra" de hierro esponjoso. Se retiraba la zamarra, que contenía carbón vegetal y escoria, entre otras impurezas, se recalentaba y se martilleaba para purificarla. Posteriormente, con ese hierro se fabricaban armas, herramientas u ornamentos.

Aunque se están aclarando los aspectos técnicos de la fundición, lamentablemente su contexto social y cultural sigue conociéndose mal; cuanto se diga, se mantiene en el ámbito de lo hipotético. La reducción del hierro obligaría a una importante inversión de trabajo y de materias primas. Recoger la madera y el mineral, preparar la arcilla, construir el horno, hacer las toberas y manejar los fuelles son, todas ellas, actividades que exigen un equipo de trabajo. La coordinación del mismo y el control de su acción sugieren la existencia de una eficaz organización y quizá también de alguna jefatura central. Sin embargo, no está claro quién pudo ejercer ese control durante la Edad de Hierro temprana.

Resulta mucho más difícil determinar los aspectos sociales y culturales de la tecnología de la Edad de Hierro que los técnicos, porque los datos disponibles son menos obvios. Sí puede asegurarse que durante la Edad de Hierro temprana el metalúrgico debió gozar de prestigio en la región interlacustre. Era el depositario de un complejo ritual y de conocimientos técnicos de gran interés para la comunidad. Aunque no dominemos las relaciones sociales que rodeaban ese trabajo, los recientes hallazgos han empezado a ofrecernos las técnicas de las que el metalúrgico era dueño y maestro.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE EARLY IRON AGE IN THE INTERLACUSTRINE REGION: THE DIFFUSION OF IRON TECHNOLOGY. Francis Van Noten en *Azania*, vol. 14 págs. 61-80; 1979.

THE ARCHAEOLOGY OF CENTRAL AFRICA. Francis Van Noten. Akademische Druck- und Verlagsanstalt, 1982.

EARLY IRON FURNACES WITH 'BRICKS' IN RWANDA: COMPLEMENTARY EVIDENCE FROM MUTWARUBONA. J. Raymaekers y F. Van Noten en *Azania*, vol. 21, págs. 65-84; 1986.

Juegos de ordenador

Imaginación y geometría coinciden en el reino cristalino de las celosías

A. K. Dewdney

Pese a la subrepticia infiltración de los ordenadores en las artes, tono a tono y píxel a píxel, subsisten vastos campos abiertos todavía a la iniciativa de los humanos. Los diseños que llamo celosías no se exhiben en la pantalla del ordenador, sino en hojas ordinarias de papel; no los genera en pocos segundos algún programa, sino que emergen lentamente de reglas y compases guiados por la mano.

Los diseños se generan cuando la imaginación se encuentra con una formación de círculos dispuestos al tresbolillo. Cualquiera puede jugar y (posiblemente) producir una red de líneas entrelazadas que a un tiempo deleita y desconcierta a la mente. Son diseños similares a los que hallamos en tumbas antiguas, en mezquitas y palacios, desde Sevilla a Samarcanda. Sus ornamentos rectilíneos, procedentes del mundo árabe de tiempos medievales, permite intuir la infinitud en el ámbito de un espacio finito. ¿Se valieron verdaderamente aquellos orfebres y artesanos de los métodos que voy a describir? Los especialistas no saben de cierto cuáles fueron los métodos empleados; empero, las reverberaciones y ecos matemáticos de esos motivos resuenan entre la topología y la geometría.

Una celosía se puede contemplar de muchas formas; tal vez la búsqueda de sus simetrías constituya un buen punto de partida. Por ejemplo, la versión terminada del ejemplar mostrado en la figura 1 ofrece un alto grado de simetría: podemos girarla 120 grados en torno a ciertos puntos y acabar en una configuración idéntica. Los elementos fundamentales del motivo son bandas doradas, entretejidas a modo de diminutas autopistas sobre un paisaje potencialmente infinito. A lo largo y ancho de todo el diseño reconocemos circunferencias, espaciadas y distribuidas de acuerdo con la simetría subyacente a todo él. Las bandas viajan de uno a otro círculo, convergiendo en grupos de doce, para luego doblarse en ángulo y separarse abruptamente. El ángulo de reflexión es igual que el de incidencia. También las bandas tienen formas, que en este caso son hexagonales o serpeantes zig-zags. Dondequiera que se mire se advertirá la alternancia de pasos por alto y por bajo. ¿Por qué procedimientos se creó esta disposición?

Las celosías pertenecen a una gran categoría de figuras infinitas, que gozan cuando menos de dos simetrías de traslación independientes. Si trasladamos la configuración en una de esas direcciones, deslizándola sobre una copia de sí misma, tarde o temprano la configuración y su copia quedarán perfectamente alineadas y superpuestas. Por mucha que sea la astucia con que se trace una configuración infinita, en cuanto presente invariancia frente a traslaciones en dos direcciones distintas, inevitablemente habrá de pertenecer a uno de los 17 posibles grupos cristalográficos, cuya clasificación llevó a cabo el científico ruso Evgraf S. Fedorov. Habida cuenta del enorme tesoro de celosías que nos ha legado el pasado, no sorprende que hallemos ejemplos de los 17 grupos lo mismo atisbando tímidamente a través del enrejado de una ventana de palacio que proclamando la grandeza del sultán en el salón del trono.

Las traslaciones no son más que una de las cuatro posibles clases de operaciones de simetría que podemos efectuar en un plano estampado con un motivo. Una simetría axial, o reflexión respecto de una recta, voltea el plano como si fuese un inmenso portalón, cuyos goznes formasen una línea recta contenida y yacente en el propio plano. Tal es, en esencia, la operación que realiza un espejo, una operación que invierte la orientación de las letras y que hace a los rostros parecer levemente distintos. La tercera operación de simetría es la rotación, en la cual un plano gira un determinado ángulo en torno a un punto. El cuarto y último tipo de simetría recibe el nombre de deslizamiento-reflexión, y consiste en una traslación seguida de una reflexión (o simetría axial) respecto a una recta paralela a la de traslación.

Las operaciones de simetría, cualquiera que sea su tipo, pueden combinarse en número finito sin más que efectuarlas en secuencias predeterminadas. Al proceder así surge una estructura matemática llamada grupo. En un grupo, el producto de dos cualesquiera de sus operaciones es una operación, y cada operación tiene una inversa, que deshace lo que ésta lleva a cabo. Todo grupo tiene, además, un elemento llamado identidad (en este caso, la operación de no hacer nada). Se ha de cumplir la ley asociativa, esto es, cuando se efectúa una sucesión de tres operaciones, no importa que la tercera siga a las dos primeras, o que las dos últimas sigan a la primera. Así enunciada, la ley asociativa suena un tanto perogrullesca, pero ello es porque, en el caso de las operaciones de simetría en el plano, la ley asociativa es de una claridad transparente. El grupo de simetrías correspondientes a la celosía de mi ejemplo recibe el nombre de grupo *p*6 en el lenguaje cristalográfico internacional. Se caracteriza por tener rotaciones de 60 grados en torno a un conjunto de centros, y rotaciones de 120 grados en torno a otro conjunto. Los lectores no tendrán dificultad en hallar tales centros en la ilustración.

Obtuve este diseño hace algunos años, por el método que esbozaré posteriormente. Luego descubrí la misma celosía en un libro sobre arte islámico. Mi desilusión por no haber sido el primero quedó más que compensada por el propio descubrimiento; el método parecía confirmado. Desde entonces he tenido la fortuna de "redescubrir" otros diseños.

El procedimiento requiere que el candidato a artesano prepare un red de puntos. Los tipos de mallas se limitan a cuatro: triangulares, cuadradas, rectangulares y hexagonales. No cuesta dibujar con regla y compás estos retículos de puntos: se traza una línea base y, con el compás, se marcan una serie de puntos equidistantes. En los reticulados cuadrados y rectangulares se realiza una construcción en ángulo recto al añadir nuevos puntos por encima y por debajo de la línea base. En los reticulados triangulares y hexagonales es preciso utilizar triángulos equiláteros.

El diseño que comentamos nació a la vida en forma de red triangular. Se dibuja a continuación una circunferencia en cada uno de los nodos de la red. Ya en este punto interviene la intuición, pues el tamaño de las circunferencias reviste importancia crítica. Explicaré inmediatamente el papel que desempeña la intuición al determinar su tamaño.

Una vez dibujados todos los círculos, el aprendiz de artesano selecciona so-

bre la circunferencia una serie de puntos equidistantes, que serán anclajes de los elementos lineales del diseño. El número y posición de los puntos tiene que reflejar la simetría de la propia red; dicho de otro modo, los puntos han de conservar la simetría en lo tocante a giros y reflexiones; cualquiera de las simetrías que haya de poseer nuestro diseño deberá llevar los puntos señalados de una circunferencia sobre puntos de sí misma o de otra. En el ejemplo que estamos construyendo, el número de puntos de cada circunferencia ha de ser múltiplo de 3. Opté por tomar 12, para dar cuerpo a la celosía. Dado que la configuración subyacente debía tener simetría axial, los puntos de las circunferencias sólo podían ocupar dos posiciones. Elegí aquella en la que seis de los puntos se encontraban lo más próximos posible de los círculos vecinos. Como regla general, siempre que se deba elegir, resultarán óptimas las opciones que armonicen con las simetrías ya presentes.

En la siguiente etapa de la construcción se unen los puntos de cada circunferencia con puntos de otras. Vuelve aquí a intervenir la intuición, pues las posibilidades se dirían tan numerosas que sólo ésta parece poder servirnos de guía. En realidad, las posibilidades combinatorias se hallan, una vez más, fuertemente limitadas por las condiciones de simetría: si uno cierto punto de la circunferencia A con otro de la circunferencia B, las simetrías de la configuración llevan esa conexión sobre otros puntos de la circunferencia A. Aunque no hayamos dibujado más que dos líneas, puede que ya resulte necesario borrar el experimento y ensayar otra conexión.

Una especie de bucle de realimentación liga esta fase de diseño con la elección previa de tamaño de la circunferencia. Aunque surja un esquema aparentemente satisfactorio de interconexión, los resultados quizá ofrezcan un aspecto poco auténtico, por no decir feo. Suele resultar obvio en tales casos si una contracción o expansión de las circunferencias generará conexiones paralelas a las principales simetrías de la configuración. En este caso la intuición puede propiciar el salto de la inteligencia, dar pie a una especie de experiencia "¡Ajá!", del "¡Eureka!". De pronto, el ojo de la mente nos revela las líneas generadas por los nuevos círculos.

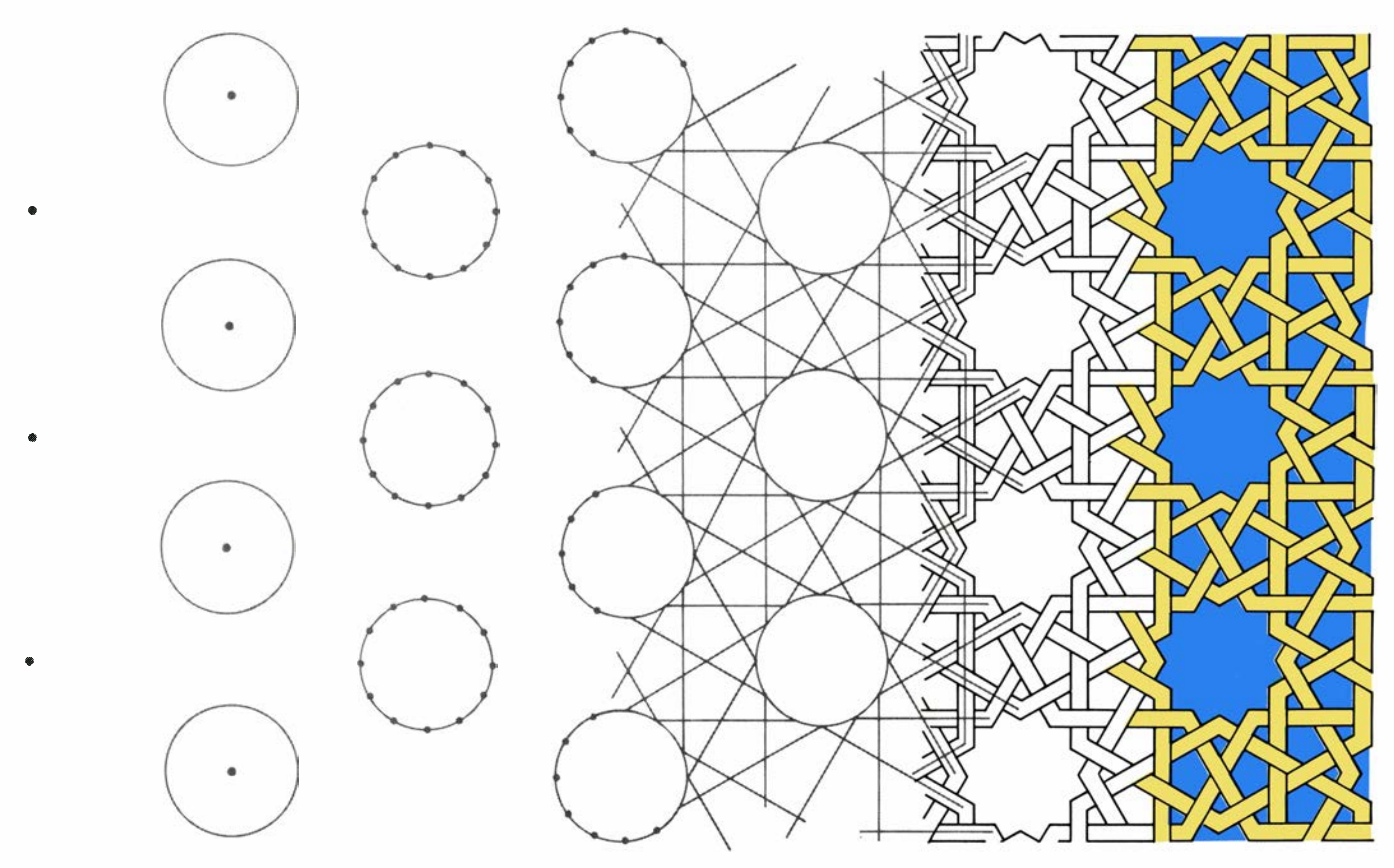
Llegado a este punto de nuestro aprendizaje, cierta impaciente excitación estremece levemente la mano que sostiene la regla o el compás. El usuario de estos instrumentos es presa de un admirado asombro, tal vez a medias artístico y a medias matemático. ¿Deberíamos ufanarnos por una intuición que meramente consistió en acceder a la geometría?

Sea como fuere, ha llegado la hora de pavimentar las autopistas del pensamiento y dotarlas de cierta anchura. Ninguna red viaria mínimamente refinada y compleja puede soportar el incordio de los semáforos. ¿Cómo, pues, entretejer e intercalar nuestras angulares autovías? Después de todo, en un verdadero tejido, trama y urdimbre se alternan en el paso por encima y por debajo. ¿Podrá verse el artesano encajonado en una especie de callejón lógico sin salida, como sucedería si una carretera hubiera de efectuar dos pasos inferiores consecutivos? La topología acude a sacarnos del apuro.

El siguiente experimento de trazado de garabatos nos muestra de qué forma. Dibujemos un rectángulo grande en una hoja de papel. Tracemos seguidamente unos garabatos en el interior del rectángulo, ateniéndonos únicamente a dos reglas:

1. Las líneas que den comienzo o fin han de hacerlo necesariamente en el contorno del rectángulo.
2. En ningún punto pueden cruzarse más de dos líneas (o partes de una).

Podemos, por ejemplo, garabatear algo similar a la composición abstracto-expresionista que vemos en la figura 2. Las líneas pueden curvarse o doblarse en ángulo y cruzarse repetidamente una sobre otra.



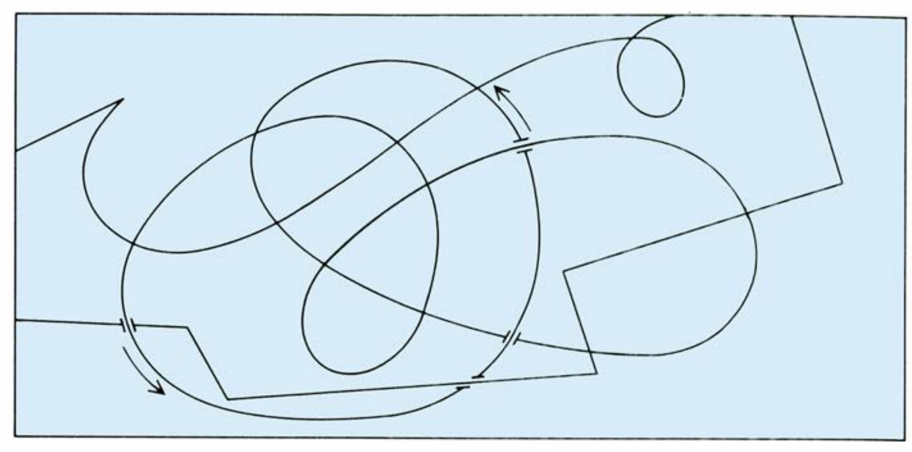
1. Diversas fases de la construcción de una celosía

Para convertir el garabato en un nudo de sagacidad inimaginable basta obedecer ahora la regla "encima-debajo": a partir del punto que se quiera, reseguimos una de las líneas, repitiendo para nosotros, "encima, debajo, encima, ...". Evidentemente, cuando decimos "encima" tenemos que hacer pasar por arriba la línea que reseguimos; por la misma regla, cada "debajo" requiere un paso subterráneo. Al cabo, se termina en el punto de partida o se alcanza la frontera del rectángulo. Por el camino, puede que la línea se haya cortado a sí misma. Admirablemente, siempre que se llega a un punto por el que ya se ha pasado, resulta tener ya la estructura idónea. Dicho de otro modo, jamás resultará necesario un paso por alto en los cruces que ya se han designado como pasos por bajo. Finalmente, se habrán construido todos los pasos, y el garabato cobrará un aspecto casi inteligente.

La regla encima-debajo funciona porque, en cierto sentido, es forzoso que así sea. La demostración más sencilla en el nivel del profano invita a una grata excursión intelectual. El garabato divide el rectángulo en muchas piezas, o regiones pequeñas. Resulta que es posible asignar a cada una de las regiones del rectángulo un color de modo tal que, utilizando sólo dos colores, ningún par de regiones que compartan frontera común tengan el mismo. (Una demostración elemental convincente de este hecho exigiría al menos unos cuantos párrafos, por lo que me apresuro a llegar al meollo de lo que interesa.) Supongamos que las regiones se hayan pintado como se ha dicho; por ejemplo, de colores rojo y azul. Al conducir a lo largo de una de las carreteras en dirección a un cruce, observaríamos que, o la región de nuestra derecha es roja, y azul la de la izquierda, o viceversa.

La receta para los cruces está agazapada en la sencilla observación anterior. Al viajar por una carretera, la cuadrilla mental encargada de la construcción sabrá si debe construir un paso elevado o subterráneo cada vez que se llegue a un cruce: si la región situada a mano derecha es roja, se construye un paso elevado; si azul, subterráneo. El resultado es exactamente el mismo que si la cuadrilla hubiera seguido la regla encima-debajo antes mencionada (o posiblemente, la "imagen negativa" de ello).

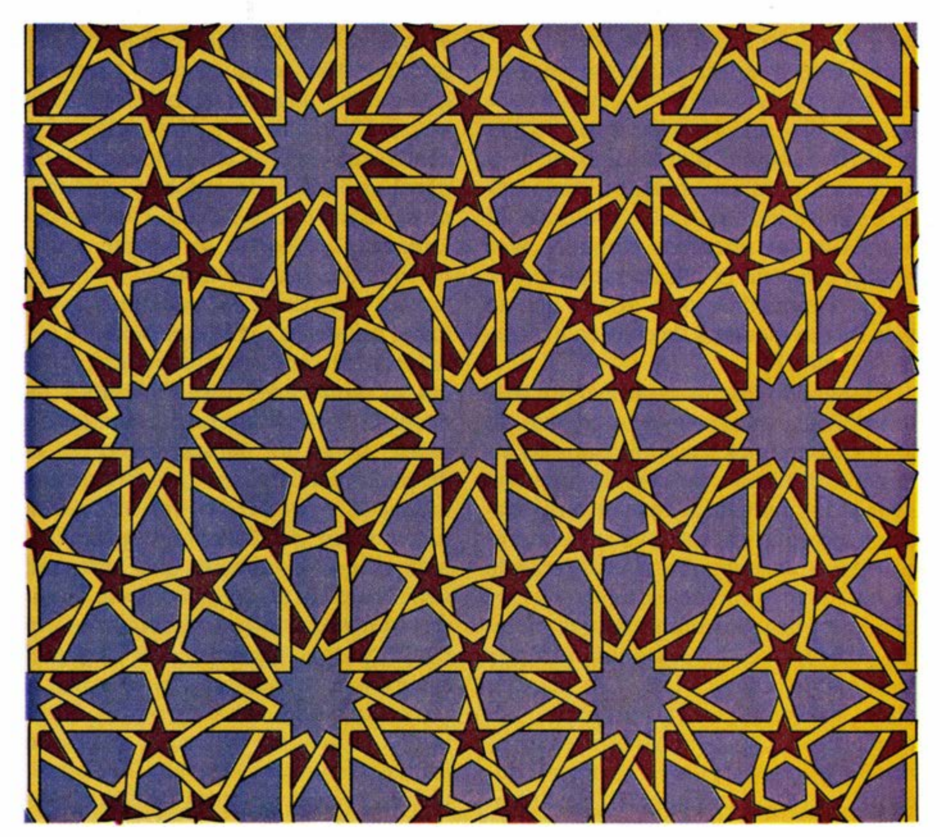
Provisto de lápiz y regla, el lector proyectista puede engrosar sin dificultad todas las líneas de la celosía, trazando a cada lado rectas paralelas. En los vértices donde la curva se dobla en



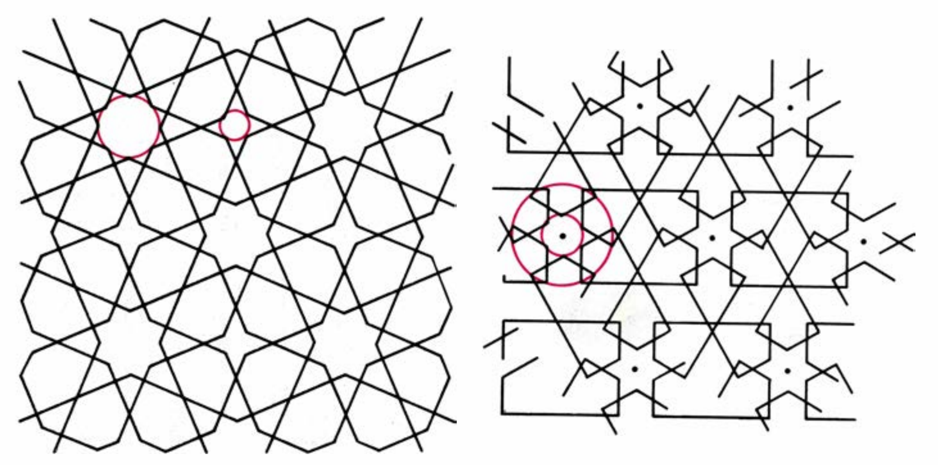
2. Así progresa la regla "por encima-por debajo"

ángulo es preciso retocar un poco los encuentros de estas líneas; no obstante, el proyecto avanza más o menos mecánicamente. El procedimiento de engrosamiento puede hacer caso omiso de los cruces hasta haberlos completado. Armado entonces de goma de borrar, el artesano ataca los cruces, invocando la regla encima-debajo en su avance. Para crear un paso elevado hay que borrar los dos segmentos de linde de carretera que atraviesan la autovía por donde uno viaja. Nada más hacerlo el paso elevado cobra existencia. La carretera que se borró parece pasar por debajo de la carretera en la que nos encontramos. Los pasos subterráneos se crean por el procedimiento opuesto. Es interesante observar que el procedimiento de intercalado destruye todas las simetrías de carácter axial que pueda tener la configuración; la pauta reflejada puede parecer la misma, pero los pasos por alto y por bajo se hallan intercambiados.

En las últimas etapas de su creación, los diseños se entintan y colorean. Una buena pluma o tiralíneas correrá sin desmayo por el borde de la regla y trazará una línea continua con ocasionales interrupciones en los ángulos y cruces. Entintar un diseño de complejidad moderada quizá nos lleve una hora o más; pero, ¿qué es una hora en el mundo intemporal del artesano? Durante esta fase nos queda tiempo para pensar en otras cosas; tal vez sea una forma de relajada meditación.



3. Una celosía árabe



4. Esqueleto de dos celosías

Pasado a tinta el diseño y borradas todas las marcas de lápiz, podemos colorearlo. Como este proceso no siempre rinde el resultado apetecido, convendrá copiar el original entintado y colorear la copia. Así, el original engendrará numerosos descendientes, progresivamente más hermosos. Aconsejo el uso de témperas. Se extienden homogéneamente, apenas pandean el papel y se ofrecen virtualmente en todos los colores, incluidos oro y plata. Además, parece como si las tintas xerográficas repeliesen las pinturas al agua; lo cual resulta un hecho afortunado porque, a menos que se tenga un pulso muy firme, es casi inevitable que repintemos las líneas de tinta, mientras pretendemos que, para reforzar el contraste, las zonas de color queden finamente contorneadas de negro.

Los colores seleccionados serán, evidentemente, cuestión de gusto personal. En las celosías auténticas suelen utilizarse colores primarios oscuros y apagados para las regiones comprendidas entre las bandas. Se pretende de ese modo que retroceda el fondo, para realzar más aún la celosía propiamente dicha. He añadido otro diseño que se vale de ese esquema de coloreado [*véase la figura 3*].

El segundo diseño se obtuvo por métodos similares al primero. Además de lo que podríamos llamar círculos de inflexión primarios, las celosías de nivel avanzado también presentan otros círculos secundarios. Cada estrella de cinco puntas del segundo diseño procede de uno de esos círculos secundarios. He añadido otros dos encantadores ejemplos de celosías, presentados en forma meramente esquelética. En uno de ellos, las circunferencias primaria y secundaria ocupan distintos centros de simetría rotacional; en el otro son concéntricas [*véase la figura 4*]. Se descubrirán ambas celosías en entornos clásicos.

Las celosías están emparentadas de cerca con las teselaciones bidimensionales: configuraciones obtenidas adosando sobre el plano múltiples copias de una pieza de determinada forma, sin que se superpongan o traslapen. Toda celosía puede generarse a partir de una única figura de tamaño finito; en concreto, de una tesela, o loseta. Sobre tal loseta figura una pequeña porción del diseño global. De disponerse de gran número de copias de la misma loseta, se podría reproducir la celosía, hasta darle el tamaño que se quisiera, sin más que colocar de la manera adecuada el suficiente número de teselas. El examen de cualquiera de las celosías aquí mostradas revelará en cada ejemplo la existencia de una pequeña porción que podría actuar como tesela. En cualquier caso, tenemos la posibilidad de una más amplia panorámica de tales configuraciones. Confeccionemos en papel una loseta de prueba y obtengamos muchas copias de ella. Una vez coloreadas, las losetas se prestan a una pléyade de ideas decorativas.

Mas, ¿qué decir de los diseños de celosías originales? ¿De qué modo se generaron? Y, puestos a preguntar, ¿cuál era su significado? Lisa Golombek ha dedicado muchos años a estudiar los diseños, tanto del natural como en su despacho del departamento de estudios islámicos y del Medio Oriente, de la Universidad de Toronto. Opina Golombek que el método más verosímil debió consistir en alguna especie de socalzado geométrico, concretado en retículas y circunferencias. Por lo que al significado de las celosías se refiere, Golombek toma partido por la explicación tradicional de que se utilizaron formas geométricas debido a la prohibición coránica de trazar formas con figura humana o animal. En su opinión, las celosías representan un orden cósmico distintivo del Islam. Por otra parte, en los restos de las residencias particulares aparecen celosías juntamente con obras figurativas. Dado que no se respetó la prohibición, resulta obvio que el orden cósmico les resultaba atractivo a los inquilinos.

Fui inexacto cuando afirmé que los ordenadores no desempeñan papel alguno en la confección de celosías. Aunque resulte difícil programarlo para que realice el tipo de elecciones intuitivas que ofrezcan hermosos motivos geométricos, no lo sería tanto redactar lo que podríamos considerar un programa de diseño asistido por ordenador. Tal programa situaría una red de puntos, de acuerdo con las elecciones de los humanos. El usuario humano podría asimismo seleccionar el tamaño de los círculos, el número de puntos de los mismos, etcétera. Cuando el usuario señalase los enlaces a ensayar, la pantalla entera se llenaría con el producto de la opción elegida. Se podría eliminar en gran parte la tarea más tediosa. La celosía emergería, es de esperar, de la impresora.

En abril, el relojero ciego ocupó la presidencia de un artículo relativo a los biomorfos, creación de Richard Dawkins, conocido autor de *El gen egoísta*. En puridad, los biomorfos no los crea Dawkins, sino un programa redactado por él. La pantalla de un ordenador Macintosh se divide en nueve cuadrados. El central contiene una estructura arbórea y los ocho que lo flanquean contienen variaciones del mismo. El operador del ordenador selecciona una de las variantes, que pasa entonces a ocupar la escena central y a multiplicar variantes de sí misma.

La evolución dirigida por los humanos no fructifica en árboles, sino en formas a veces extravagantes que nos recuerdan cualquier cosa, desde un insecto hasta un aeroplano. En su libro *El relojero ciego* (Labor, en prensa), Dawkins se vale de su programa para defender la tesis según la cual a pesar de que la evolución avance a pequeños pasos, puede rendir notables creaciones. Empero, todavía le inquieta que en su programa la evolución no sea exactamente ciega. ¿Cómo, se preguntaba, emerge la forma por interacción de una especie con su ambiente?

La reunión sobre la vida artificial celebrada en el Laboratorio Nacional estadounidense de Los Alamos en septiembre de 1987 congregó a científicos

y aficionados que proclamaban la emergencia de características evolutivas en los organismos por ellos creados. Ningún ingenio satisfizo a Dawkins, que se hallaba presente. John Mitterer, de la Universidad Brock, Ontario, me hizo saber de otros potenciales candidatos. Se trata de David C. Plaut, del departamento de psicología de la Universidad de Rochester, y David A. Taylor, de San Mateo, California. Al examinarlo más de cerca, el estudio de Plaut-Taylor guarda semejanza general con muchos de los proyectos presentados en Los Alamos: una criatura simple, dotada de cierta capacidad para hallar alimento y huir de sus enemigos bajo la dirección de una red neuromorfa, que le imprime cierta conducta. Las criaturas que no alcancen a sobrevivir no traspasarán a su progenie sus poco adaptados cerebros. Pero, de partida, las criaturas están dotadas ya de redes pseudonerviosas. A Dawkins le gustaría que esas redes nerviosas emergieran a partir de una estructura más primitiva bajos los efectos de un ambiente competitivo.

David A. Chess, investigador del Centro de Investigación Thomas J. Watson, de IBM, considera que, a pesar de ello, la simulación de la evolución del comportamiento resulta más gratificante. Por ejemplo, el ortosaurio que entonces describí sólo podría comerse el modelo vigente de espinofita si su cuello le permitiese alcanzar el suculento cogollo de hojas. ¿Hasta qué punto, se pregunta Chess, podría con semejante cuello huir el ortosaurio de sus depredadores? ¿Sería propenso a padecer hipertensión sanguínea, lesiones cervicales, etcétera?

Otro empleado de IBM, Donald E. Curtis, de Kennesaw, Georgia, aduce que debería prestarse mayor atención al creacionismo científico. Los defensores de dicha teoría aceptan la microevolución, esto es, cambios graduales, paso a paso, en cada especie. Sin embargo, sostiene Curtis, "no existen pruebas experimentales ni fósiles que confirmen la macroevolución, el cambio fundamental de una especie en otra."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SYMMETRY. Hermann Weyl. Princeton University Press, 1952.

ARABIC GEOMETRICAL PATTERN AND DESIGN. Dover Publications, Inc., 1973.

ART OF ISLAM: LANGUAGE AND MEANING. Titus Burckhardt. World of Islam Festival Publishing Company Ltd., 1976.

Taller y laboratorio

Convección o principio de Bernoulli: ¿cuál de los dos causa el aleteo interior de la cortina de la ducha?

Jearl Walker

En la ducha, molesta no poco el vaivén de la cortina, que impide una cómoda higiene personal. Hay varios procedimientos para detener ese movimiento de la cortina. Si la ducha está en una bañera, podemos mantener la cortina contra aquélla con unos pequeños imanes dispuestos a lo largo del fondo; el mismo efecto se produce humedeciendo la cara exterior de la cortina. Otra solución consiste en colgar por el exterior de la bañera una segunda cortina, decorativa, que parece obstaculizar el paso de la corriente de aire que, sin ésta, impulsaría hacia dentro a la cortina verdadera. Si la ducha es de plato, y no de bañera, el único remedio que conozco es añadir pequeños pesos a lo largo del borde inferior de la cortina.

Resulta más fácil eliminar ese contratiempo que explicar sus causas. ¿Se debe a una corriente de aire que penetra en el compartimiento de la ducha por debajo de la cortina, tal como cabría esperar cuando la ducha está caliente y el aire del cuarto de baño está frío? ¿Se mueve acaso porque decrece la presión del aire o del agua dentro del compartimiento, en virtud del principio de Bernoulli? Al estudiar el asunto, he descubierto que ni una ni otra explicación parecen correctas. El principio hidrodinámico de Bernoulli no parece intervenir en el movimiento de la cortina, la corriente de aire que pasa por debajo de aquélla suele dirigirse hacia fuera, incluso en la ducha de agua caliente.

Comenzaremos con la explicación más generalizada, sin duda: la cortina se mueve en virtud del principio de Bernoulli, así llamado en honor del matemático suizo del siglo XVIII Daniel Bernoulli. De acuerdo con el mismo, el agua de la ducha se halla a una presión inferior a la atmosférica porque está en movimiento; esa menor presión del agua reduce la presión del aire contenido en el compartimiento de la ducha y, entonces, como el aire exterior a la cortina se encuentra a la presión atmosférica, aquélla se ve impulsada hacia dentro. Los defensores de esta explicación destacan que cuanto más deprisa corre el agua, más adentro avanza la cortina, pues una corriente más rápida implica una mayor reducción de las presiones del agua y del aire interior al compartimento.

El principio de Bernoulli se refiere a la energía de un fluido en movimiento. Si la corriente está confinada, tal como sucede cuando discurre por un tubo, la energía debe permanecer constante (siempre que el rozamiento en las paredes pueda despreciarse). Supongamos que la corriente atraviese un tramo de tubo donde éste se estreche. Al penetrar el agua en esa zona, su velocidad aumentará y lo mismo ocurrirá con la energía asociada a esa velocidad (energía cinética). Tal aumento de energía cinética se desarrollará a costa de la presión del fluido, que es una forma de energía potencial. El principio de Bernoulli afirma que la energía total se mantiene constante en ese intercambio. En un tubo, las zonas de fluido más rápido están a una presión más baja.

El caso del chorro de una ducha, al no estar limitado por unas paredes es diferente. Cuando el agua sale por la alcachofa, su presión se iguala a la del aire circundante, que es la atmosférica. En su caída, el agua aumenta de velocidad (como pasa con la mayoría de los objetos que caen), pero ese aumento de velocidad se debe a la gravedad, y no a la presión del agua, que sigue igual a la atmosférica. Así, pues, la aplicación del principio de Bernoulli no justifica el movimiento de la cortina y, además, pasa por alto que una ducha se acerque más a una lluvia de agua pulverizada que a un chorro continuo.

Los partidarios del principio de Bernoulli introducen a veces el movimiento que el chorro o pulverización de agua comunica al aire. El agua arrastra consigo parte del aire, obligándolo a moverse hacia abajo. Por constituir el aire un fluido, ¿sería aplicable en este caso el principio de Bernoulli? Dicho de otro modo, ¿adquiere energía cinética el aire a costa de su presión? Pues no; si gana energía cinética es porque el agua le obliga a moverse.

En otra explicación acerca del movimiento de las cortinas de las duchas, también muy generalizada, se recurre a la convección, el fenómeno que produce el tiro de las chimeneas. Así, cuando el agua de la ducha esté más caliente que el aire del cuarto de baño, calentará el aire contenido en el compartimiento, y éste se elevará y circulará por encima de la cortina, en dirección al cuarto de baño. En éste, el aire está más frío y, por tanto, deberá circular por debajo de la cortina hacia el interior del compartimento, remplazando al aire que sale por arriba; esa circulación hacia dentro impulsa a la cortina en el mismo sentido. Esta explicación viene respaldada por dos observaciones. Cuanto más caliente está la ducha, tanto más avanza la cortina hacia dentro, posiblemente debido a una mayor intensidad de la convección. Además, si ese aflujo se obstaculiza con una segunda cortina exterior, la cortina interior puede permanecer inmóvil.

Durante mucho tiempo di por hecho que la convección era la razón del movimiento de la cortina. Pero, hace unos años, cuando yo estaba dirigiendo un seminario que se celebraba en un hotel, una profesora puso a prueba la idea. Tras regresar a su habitación, abrió la ducha, pero sólo el agua fría. De ser correcta la explicación basada en el tiro de chimenea, la cortina no habría debido moverse hacia dentro, pero la experimentadora retornó de inmediado con la noticia de que la cortina se movía hacia dentro incluso en ausencia de calor.

¿A qué achacar, pues, el flameo de la cortina? Me decidí a estudiar dos instalaciones de ducha. Consistía la primera en una espaciosa cabina, cerrada por paredes de azulejos y una puerta de vidrio (salvo un hueco encima de ésta).

La otra se hallaba en una bañera, rodeada de tres paredes de azulejos y una cortina sencilla de plástico. En ambos recintos, el agua caía en el centro del lugar. La zona de impacto, donde el agua chocaba con el suelo, ocupaba aproximadamente la mitad de la anchura de la cabina y toda la anchura del fondo de la bañera. Comencé mis investigaciones en la ducha de cabina, puesto que ésta era lo bastante espaciosa para permitirme estudiar la circulación del aire sin necesidad de exponerse al remojón.

Para examinar el movimiento del aire en el interior de ambos recintos, me serví de una vela encendida. La orientación de la llama me proporcionaba una tosca indicación de la dirección y velocidad del movimiento, en especial en el caso de corrientes horizontales, que desviaban la llama de la vertical. Las corrientes ascendentes alargaban la llama, mientras que las descendentes la acortaban. Las turbulencias creaban en ella un baile frenético.

Estábamos en invierno. Temí que las variaciones en la calefacción de la casa influyeran en la convección dentro de ambos cuartos de aseo. Para reducir esa posibilidad, cerré las puertas de los dos y mantuve en un punto fijo el termostato que controlaba la calefacción de la casa; dos horas más tarde las temperaturas del aire se habían estabilizado en ambos cuartos de baño a unos 20 grados. Dejar correr una ducha caliente o fría habría tendido, por supuesto, a caldear o enfriar el cuarto de baño, por cuya razón trabajé con rapidez suficiente para que la temperatura ambiente no variase más de dos o tres grados en el curso de cada ensayo.

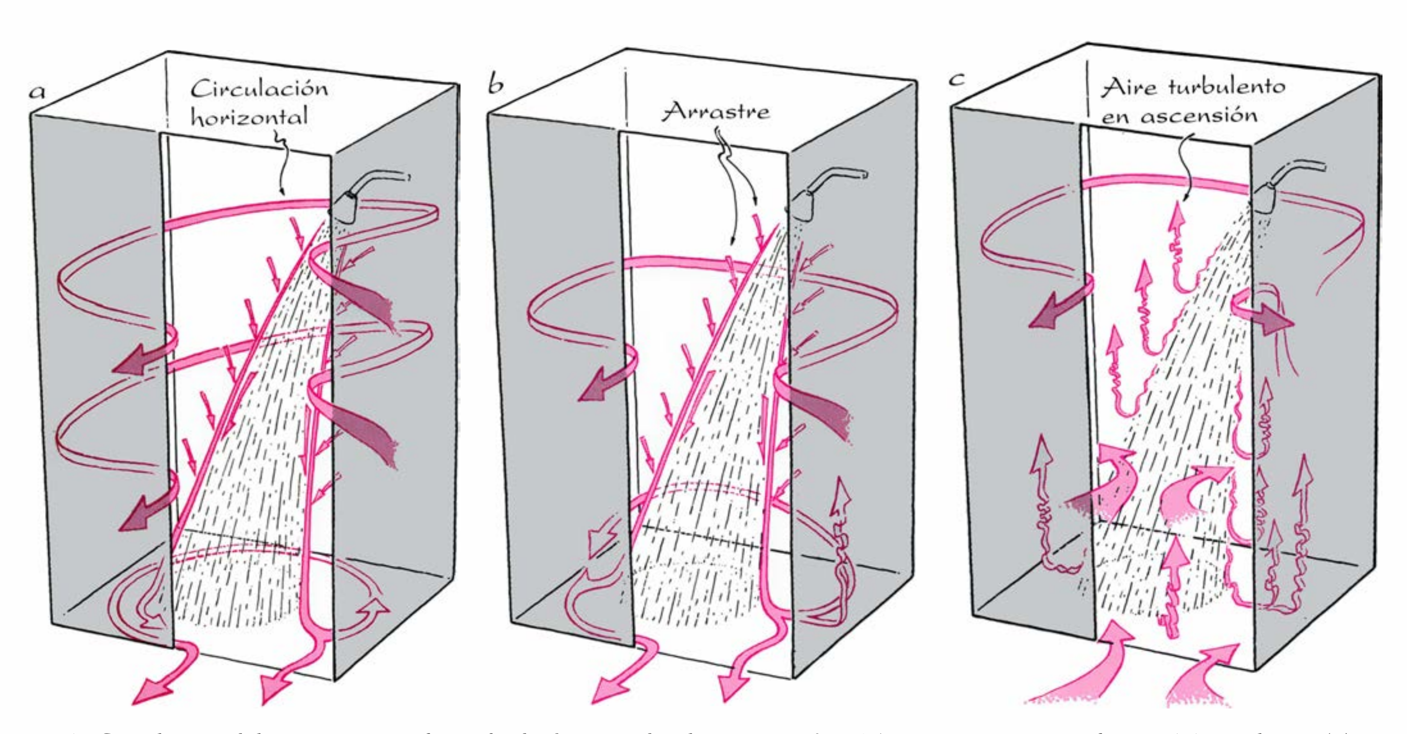
En cada prueba tomé nota de las direcciones del flujo de aire sobre fotocopias de los croquis de los compartimentos, en los que había identificado con rótulos cada una de las tres paredes. Llamé "pared trasera" a la opuesta a la puerta o cortina, "pared de cabeza" a la correspondiente a la alcachofa y "pared de pie" a la opuesta a la pared de cabeza.

La llama de la vela oponía una sorprendente resistencia cuando sondeaba el aire en las cercanías de la caída de agua, aunque se apagaba muchas veces. Para volver a prenderla, mantuve una segunda vela encendida dentro del cuarto. Cada vez que el agua sofocaba la llama, acercaba rápidamente la mecha húmeda a la llama de la segunda vela, que evaporaba el agua con un chisporroteo y enseguida volvía a prender la mecha. (Si alguien intenta estas experiencias, que tenga cuidado para no quemarse y para que la segunda vela no provoque un incendio.)

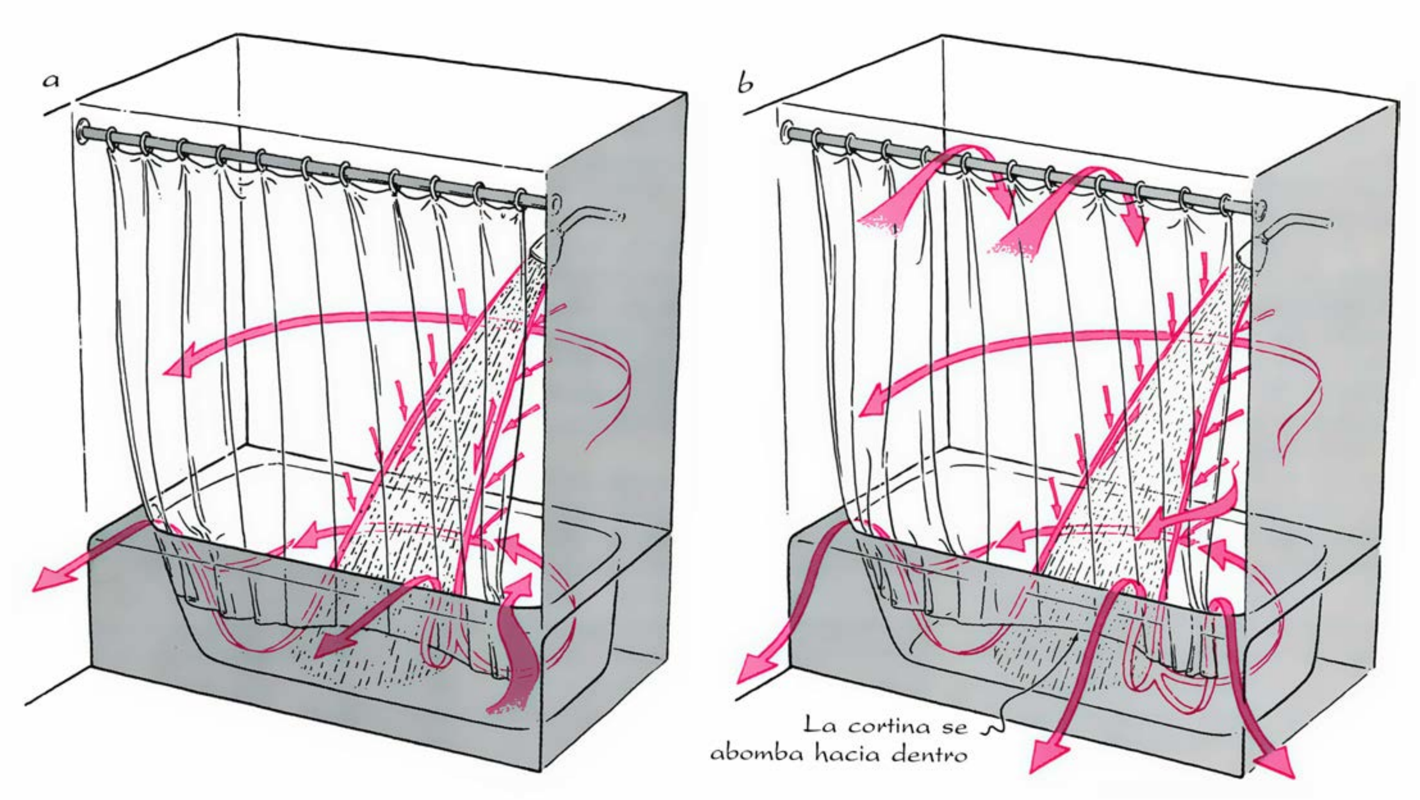
La puerta de acceso a la cabina se encontraba junto a la pared de cabeza. Dejándola abierta, dejé correr la ducha sólo con agua fría a unos cinco grados Celsius. Aunque el agua no resultaba agradable para mis pies desnudos (por lo demás, estaba vestido), pude arreglármelas para levantar un mapa de la circulación del aire dentro del compartimiento y a través de la puerta [*véase la figura 1*]. El aire fluía vigorosamente hacia fuera a todo lo ancho de la parte inferior de la abertura. En la parte superior, el aire escapaba al exterior por el lado cercano a la pared de pie, pero penetraba en el recinto por el lado contiguo a la pared de cabeza. Dentro de la cabina, el aire circulaba horizontalmente alrededor de la caída de agua a todas las alturas, desplazándose desde la pared de cabeza, a lo largo de la pared trasera, para seguir paralelamente a la pared de pie y, al final, escapar por la puerta.

Al sostener la vela cerca de la caída de agua, la llama era atraída por ésta; el aire sufría, pues, un fuerte efecto de arrastre. Este se manifestaba en una zona de aproximadamente un centímetro de grueso del lado de la pared de cabeza, y de un grueso doble en el lado contrario. En la zona del suelo contigua al lugar donde caía el agua, el aire fluía con intensidad, alejándose de la superficie del impacto; luego se unía a la circulación horizontal o bien se escapaba por la puerta. Puesto que el agua enfriaba el aire encerrado en el compartimento, parte de la distribución de corrientes que pude consignar se debía, desde luego, a un fenómeno de convección.

Al objeto de eliminar la convección, procedí seguidamente a abrir el grifo del agua caliente hasta que el agua de la ducha se puso a menos de un grado de diferencia respecto a la temperatura del cuarto de baño. (Ajusté los grifos



1. Circulación del aire en una cabina de ducha cuando el agua está fría (**a**), *a temperatura ambiente* (**b**) *y caliente* (**c**)



*2. Circulación del aire cuando una ducha de bañera está a la temperatura ambiente (**a**) y fría (**b**)*

del agua fría y del agua caliente para mantener el caudal original.) Tras aguardar 30 minutos para que el recinto se ajustara a la nueva temperatura del agua, comencé a tantear la circulación del aire con la bujía.

La circulación horizontal en torno a la caída de agua volvía a manifestarse claramente en las proximidades del suelo y a alturas intermedias, pero ahora resultaba débil en las proximidades del techo del compartimento. Junto a la pared de cabeza fluía hacia arriba aire turbulento. En el costado de la caída de agua correspondiente a la pared de cabeza, el arrastre de aire era similar al detectado antes, pero en el costado correspondiente a la pared de pie, el aire arrastrado viraba hacia la pared trasera para unirse a la circulación horizontal. Igual que antes, el aire fluía enérgicamente hacia fuera por la parte inferior de la puerta; el flujo hacia dentro por la mitad superior de la abertura era ahora débil.

El aspecto más interesante de la circulación del aire se presentaba en el suelo. El aire que se desprendía del arrastre se alejaba de la zona de impacto. Parte del mismo se escapaba por la puerta, mientras que el restante acababa ascendiendo por una pared, para incorporarse luego a la circulación en torno a la caída de agua.

Cerré el agua fría y aumenté la alimentación de agua caliente, tratando también de mantener el mismo caudal. La temperatura del agua subió hasta los 51 grados, pero después descendió gradualmente hasta los 45 grados, a la vez que el calentador del agua pugnaba por mantener el ritmo de producción de calor. La circulación del aire por el interior del compartimento difirió notablemente de los ensayos precedentes. Por la parte inferior de la puerta el aire penetraba con gran intensidad. La circulación horizontal en torno a la caída de agua había desaparecido, salvo en las cercanías del techo. En todos los puntos de la parte inferior del compartimiento, la vela revelaba un intenso flujo ascendente. Las propias zonas de arrastre parecían haberse modificado: el aire arrastrado se calentaba con tal rapidez que se desgajaba del agua y, de hecho, se elevaba.

Pasé entonces de la cabina a la bañera. Lo que había descubierto en la primera me había enseñado que la convección puede alterar el sistema circulatorio establecido por el arrastre. En la bañera, por tanto, lo primero que hice fue llevar el agua de la ducha a la temperatura ambiente, para investigar qué acontecía en ausencia de convección.

La cortina se movía hacia el interior del compartimento, con gran fuerza en la parte más cercana a la caída de agua y a la pared de cabeza [*véase la figura 2*]. Al igual que en los ensayos anteriores, se establecía una circulación horizontal de aire en torno a la caída de agua. El aire cercano a la caída de agua era arrastrado hasta el fondo de la bañera, y después enviado hacia fuera, siguiendo el fondo, hasta que se veía obligado a ascender por los costados; allá donde la cortina se abombaba hacia dentro, el flujo ascendente lanzaba aire al cuarto de baño. La única corriente de aire intensa que pude detectar se encontraba en la parte inferior del resquicio comprendido entre la pared de cabeza y el extremo de la cortina.

Cuando dejé correr sólo agua fría, la circulación del aire cambió en dos aspectos. El aire salía a raudales por la parte inferior del espacio comprendido entre la cortina y la pared de pie y penetraba en el compartimiento por encima del borde superior de la cortina. Por lo demás, la circulación estaba organizada igual que en los ensayos que había realizado con agua fría en la cabina.

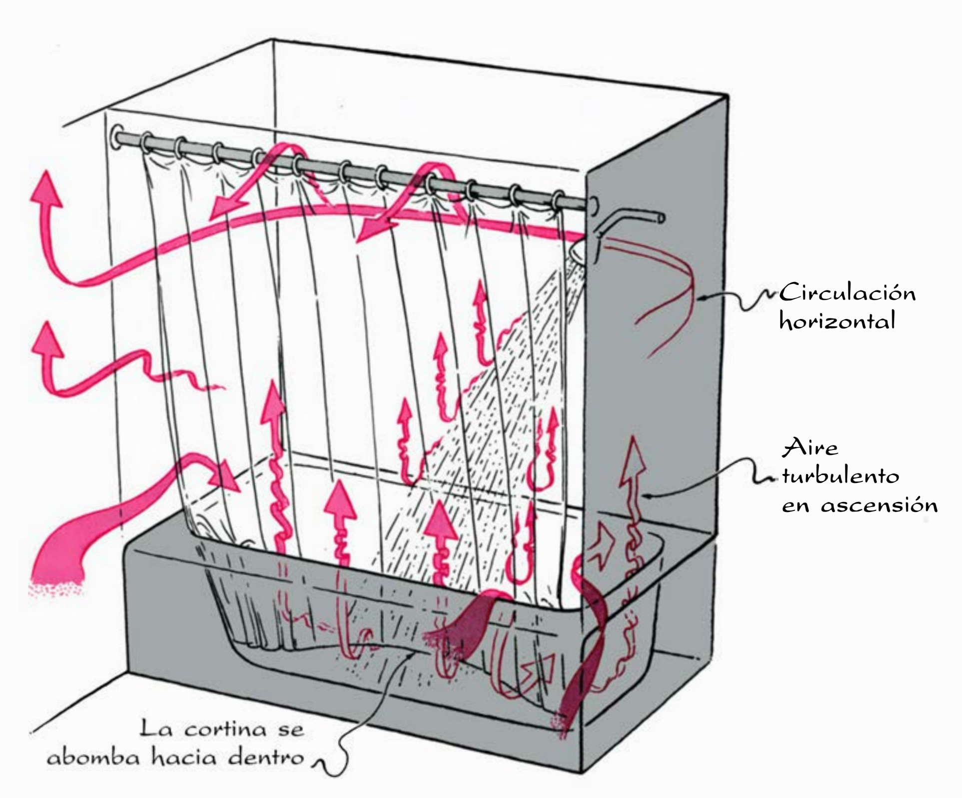
Cuando dejé correr sólo agua caliente, la mayor parte de la cortina se abombó hacia dentro; el aire se puso a fluir con fuerza hacia fuera por el resquicio creado por la combadura, salvo por la parte próxima a la pared de cabeza: allí fluía hacia dentro [*véase la figura 3*]. Por la parte inferior del espacio comprendido entre el extremo de la cortina y la pared de cabeza, el aire fluía hacia el interior del compartimiento. En el extremo de la cortina correspondiente a la pared de pie, la cir-

culación del aire mostraba un comportamiento de naturaleza caótica, aunque con predominio general hacia dentro. La circulación horizontal se había desplazado hacia la parte superior del recinto; en la parte inferior de éste el aire subía con turbulencias.

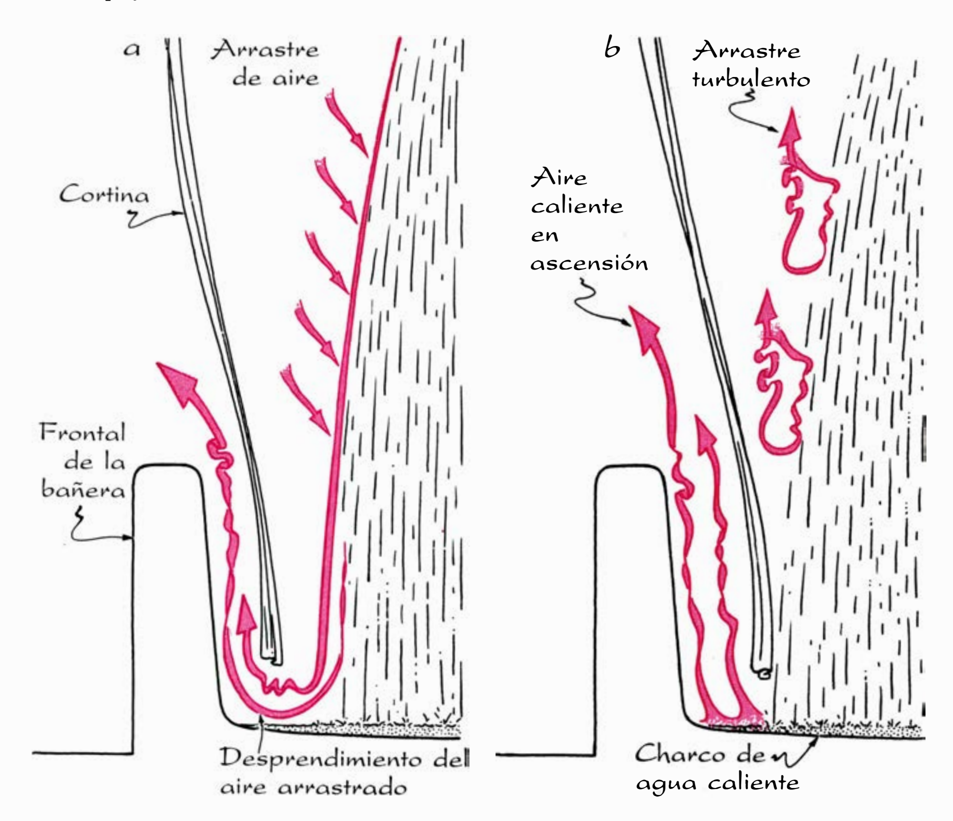
Los ensayos me habían enseñado por qué las cortinas de las duchas se mueven hacia dentro. En el fenómeno pesan tanto el arrastre como la convección, pero el primero es el factor primordial [*véase la figura 4*]. El arrastre desplaza el aire contiguo a la caída de agua, salvo en la proximidad del suelo. Por los costados correspondientes a las paredes de cabeza y pie afluía aire directamente hacia la caída, para remplazar al arrastrado y verse, asimismo, arrastrado por el agua en su caída. En la zona situada entre la cortina y la caída de agua, el relevo del aire era lento, porque el aire debía fluir primero a lo largo de la cortina y luego encaminarse hacia el agua. Cuando se inicia la ducha, la presión del aire baja, en esa zona, a consecuencia de la lentitud del relevo y, como en el exterior el aire está a la presión atmosférica, la cortina se abomba hacia dentro. Además, aunque la parte inferior de la cortina se halle próxima al lugar donde queda libre el aire arrastrado, el borde de la misma sufre la tracción de las zonas más altas. La combadura que se forma en la parte inferior abre un pasillo para que salga aire hacia el cuarto de baño. Este último movimiento procede casi siempre hacia fuera, cualesquiera que sean las temperaturas relativas que alcancen el aire y el agua.

Si el agua se encuentra a la temperatura ambiente, el flujo saliente está formado por el aire que se libera del arrastre inmediatamente debajo de la cortina. Este aire circula a ras del suelo del compartimiento, trepa pegado a la cortina por la pared exterior de ésta y se descarga finalmente en la habitación. Si el agua está más fría que el aire de la habitación, el flujo hacia fuera se ve reforzado por la convección, puesto que el aire enfriado por el agua de la ducha escapa a la habitación, mientras que el aire más cálido de ésta penetra en el compartimento por encima de la cortina. Ese flujo avivado por la convección puede agitar la cortina con mayor intensidad que si sólo se da el efecto debido al arrastre.

Si, por contra, el agua está más caliente que el aire del cuarto de baño, puede que se libere poca cantidad de aire bajo la cortina, ya que el arrastrado por la caída de agua se calienta rápidamente y se separa enseguida. No obstante, la combadura de la cortina deja expuesto un charco de agua caliente en el suelo de la bañera. Este charco calienta el aire que tiene encima, enviándolo cortina arriba, por la cara exterior de ésta, hacia el cuarto. El empuje adicional sobre la cortina provoca que ésta se mueva hacia dentro con más vigor cuando la ducha es de agua caliente que cuando lo es de agua fría. Resumiendo, el arrastre desencadena el movimiento hacia dentro de la cortina y la convección puede reforzarlo.



3. Circulación del aire cuando una ducha de bañera está caliente



*4. Arrastre del aire en una ducha a temperatura ambiente (**a**) y en una ducha caliente (**b**)*

Libros

Protomedicato, deontología biológica, teoría cuántica y semiconductores

Luis Alonso, Mariano Artigas, José L. Sánchez y F.J. de la Rubia

THE ROYAL PROTOMEDICATO. THE REGULATION OF THE MEDICAL PROFESSIONS IN THE SPANISH EMPIRE, por John Tate Lanning. Duke University Press. Durham, 1985.

Decir que esta obra es la mejor escrita sobre el protomedicato pudiera inducir a error. Es la primera. Y por lo que al crítico alcanza, en el cúmulo de promesas de la administración sobre proyectos relativos al descubrimiento de América, ninguno se ocupa del protomedicato, institución medular en la configuración del quehacer sanitario. Esta obra será, pues, por lo que se ve, también la única durante bastante tiempo. Pero queda ello compensado con la calidad del libro de Lanning, al que dedicó muchos años de su vida.

La dilatada biografía historiográfica de John Tate Lanning comenzó, a mediados de la década de los treinta, con unos trabajos sobre la labor misionera del clero español en Georgia y continuó con otros sobre la cultura académica de nuestras colonias, investigaciones que le convertirían, avanzados los cuarenta, en la autoridad indiscutible de ese dominio. A mediados de los cincuenta simultanea sus escarceos en la Ilustración con el diseño de un proyecto ambicioso: el estudio del protomedicato. Desde la voluntad del rey católico, que quiso que embarcase siempre un médico y un músico para curar y alegrar la tripulación, hasta la red jerarquizada de protomédicos, médicos, sangradores, cirujanos, algebristas... ¿cómo se fue estructurando la sanidad en las colonias? ¿Cómo funcionó durante tres siglos largos?

Lanning no pudo ver acabada su obra. Murió de cáncer en 1976. Antes, previendo el final, le entregó el manuscrito a su discípulo y amigo John Jay TePaske, quien se ha ocupado de darle cumplimiento y, al mismo tiempo, mantenerse en un discreto segundo plano. TePaske explica el alcance de su intervención en el prefacio. Sigue otro prólogo, ya de Lanning, sobre el estado de la cuestión veinte años atrás. El mismo que hoy, si exceptuamos el capítulo que Granjel dedica en su historia de la medicina española a los orígenes y desenvolvimiento del protomedicato. La institución, además, vista desde el continente sudamericano, se ha presentado en muchísimos casos con el resquemor de un nacionalismo ingenuo que la creyó sofocadora de una pujante medicina aborigen.

El libro se articula en quince capítulos, de desigual longitud. Los cuatro primeros responden a la institución jurídica: formación del protomedicato en España, relación con los municipios, organización y actividad de los actores y problemas relativos a la jurisdicción. Con ser este último el más largo, su sombra alcanza todos los demás. El amor al reglamento más que a la ley, el pundonor por el protocolo, la cobranza de las costas, el título académico y, sobre todo, su acreditación... parecen importar, en muchísimos casos, más que la calidad del acto médico, la preparación, la gratuidad de la medicina y la penetración de este servicio en los pueblos, las aldeas y en todas las clases sociales. Lanning ha manejado infinidad de legajos, ha leído múltiples informes con paciencia benedictina para extraer, de la anécdota, de la queja o la demanda a la metrópolis, la categoría del funcionamiento diario de la institución en Nueva España, Nueva Granada, Argentina o Chile.

Las relaciones del protomedicato con la universidad, por ejemplo, nos evocan una lucha por quitar al poder civil —el cabildo o el virrey— la capacidad de nombramientos, a menudo en favor de amigos y afectos, para cedérsela a quien en buena lid ha demostrado estar más capacitado: el catedrático de prima. La cruz de esa moneda pudiera estar en la escasez de médicos que salen de las aulas universitarias y la mercantilización de la profesión, siempre atenta a no dejar escapar gabelas, por no hablar de la facilidad con que se rendía al soborno de la compra de títulos o clases. Debilidad que se tornaba dureza con los intrusos, los "indocumentados" o los curanderos. (Caso aparte merece el de los empíricos de raza india que curaban a los de su propia estirpe y que tiene muchos rasgos de afinidad con los médicos moriscos.) Todos los médicos recién llegados debían demostrar su habilidad ante el protomedicato, aunque procedieran de otras universidades, llámense incluso éstas Montpellier, Leyden o Toulouse.

Nos introducimos así en el segundo grupo de capítulos: del 5 al 9 (práctica ilegal de la medicina, médicos extranjeros al servicio de la corona, limpieza de sangre, beneficencia y caridad y, por fin, el orgullo de clase), cuyo común denominador es la consideración social del médico, que trasciende —en línea de principio— la mera función administrativa para convertirse en un servicio. A diferencia de otras funciones, en ésta la calidad personal del servidor importa tanto o más que el ministerio desempeñado. Lo que no es de extrañar en una concepción transcendente del hombre como la imperante en las leyes de la metrópolis y, por extensión, de las colonias. Aunque una cosa era la ley y otra la praxis diaria; aquélla exigía limpieza de sangre, por ejemplo; ésta desvirtuaba tal condición con la tolerancia de empíricos mulatos, "pardos" o hijos ilegítimos. Más aún, a veces bastaba probar años de práctica y habilidad en el arte para convertir en papel legitimador una situación ilegal. La propia escasez de médicos hizo que desempeñaran esa función religiosos y sacerdotes, con la dispensa oportuna o la excusa de necesidad eximente.

Del capítulo 10 al 13, ambos inclusive, el autor recrea las relaciones de la medicina, y por tanto del protomedicato, con la farmacia, la cirugía, la flebotomía y la obstetricia. No se pierde en el legajo y la anécdota; antes bien, teje un verosímil tapiz de fondo con los personajes, las normas y el saber imperante. A modo de ejemplo, el lector sacará más partido de lo que aquí encuentra a propósito de la *Palestra* de Palacios y Bayá y su influencia en la farmacia de su tiempo, que en otros trabajos de esta parte del Atlántico. Dígase lo mismo del cambio de apreciación social del cirujano a raíz de la creación de las escuelas de Cádiz, Barcelona, México y Madrid, a mediados del XVIII o un poco más tarde. Si alguna objeción: ¿por qué no se ocupa Lanning de la albeitería?

Sabido es que en el establecimiento de escuelas y universidades por los frailes españoles, o la corona y el pontífice

en última instancia, la colonización española supera la inglesa, por ejemplo. Bueno será recordarlo con las palabras del propio autor, que resumen el espíritu de los capítulos 14 y 15: "A tenor de la situación institucional y cultural europea, podríamos afirmar que el español se encontraba más cercano que el británico al modelo europeo. Por lo menos tenían a su alcance las universidades y las cátedras de medicina" (pág. 325). Un proceso de aculturación que contó, desde un comienzo, con el estudio de la farmacopea local. El glosario español-inglés del final de esta magnífica obra es útil incluso para los castellano-hablantes. (L. A.)

Deontologia biologica, por N. López Moratalla, F. Ponz, A. Llano y otros. Universidad de Navarra; Pamplona, 1987.

En la actualidad tenemos viva conciencia de las repercusiones de la ciencia y de la tecnología, tanto en la teoría como en la práctica, en la vida privada o en la pública. Si bien esto es válido para un amplio espectro de ciencias, sin duda ha de afirmarse, como lo hace L. Montuenga (pág. 100), que la biología se ha mostrado capaz de una notable influencia en la configuración de la sociedad moderna, a pesar de ser una ciencia relativamente joven, de modo que su incidencia en las ideas dominantes resulta decisiva. Por este motivo es interesante una obra como la que comentamos, que se dedica al estudio de dicha repercusión.

Además, es oportuna. Cada vez se hace más evidente que la valoración última de los problemas debe responder a criterios éticos, puesto que son los únicos que salen al encuentro de las cuestiones en las que está comprometido el bien de las personas. Los criterios que se limitan al terreno de una objetividad no comprometida tienen, sin duda, un amplio ámbito de validez, pero resultan insuficientes cuando se abordan los problemas humanos. Las aplicaciones de la ciencia mediante la tecnología no son neutrales, e incluso la ciencia misma puede prestarse a reduccionismos que no son propiamente científicos, como sucede cuando se reduce al hombre a un conjunto de acontecimientos físicos que pueden manipularse a voluntad. Los reduccionismos teóricos y la superioridad de la tecnología sobre la ética son dos peligros típicos de nuestra era.

No es fácil abordar estos problemas. Se exige una preparación tanto científica como filosófica que permita cubrir la separación que suele existir entre estos dos ámbitos y hacerlo con el rigor necesario, o sea, distinguiendo los distintos planos —científico, técnico, ideológico— sin mezclarlos, pero estableciendo a la vez sus conexiones, de modo que se llegue a valoraciones éticas bien fundadas.

Una manera de hacerlo es formular síntesis unitarias y aplicarlas a los diferentes problemas. Otra diferente, no sólo legítima sino atrayente, es la que se ha elegido en esta obra, en la que se adopta un enfoque interdisciplinar y plural: se plantea un amplio espectro de problemas y se deja que sean tratados por profesionales de diversas especialidades científicas y filosóficas. No se intenta agotar todo lo que puede decirse ni presentar un producto fosilizado. Los temas se tratan en apartados relativamente breves, de fácil lectura, y cada uno de ellos incluye un estudio específico y, además, referencias e indicaciones bibliográficas para continuar y completar las reflexiones.

La obra contiene 27 ensayos redactados por 12 profesionales de la biología, la filosofía y la ética, que conservan el estilo directo de las lecciones universitarias que les han dado origen. Los editores han asumido el riesgo que implica tratar muchos temas que tienen notable peso específico. El plan es ambicioso. La primera parte (págs. 1-104) se dedica a la ética de la actividad humana. La segunda (págs. 105-224) trata sobre la ética del conocimiento científico. La tercera (págs. 225-409) ocupa casi la mitad de la obra y se refiere a la ética de la investigación biológica, que es el tema anunciado en el título.

El resultado es un amplio tratado en el que se encuentran abundantes datos y reflexiones acerca del valor del conocimiento científico, la fundamentación científica de la ética, la filosofía del trabajo, la función del biólogo en la sociedad, las relaciones entre biología y antropología, los criterios éticos sobre el dominio de la naturaleza, la sexualidad, la experimentación biomédica, el uso de fetos humanos en la investigación, la manipulación genética, la eugenesia, la manipulación de la reproducción humana, las armas químicas y biológicas, la crisis energética y, cómo no, la experimentación en animales. Los autores han sabido conseguir un nivel de exposición en el que el necesario rigor va unido a la claridad, de modo que la obra puede interesar a un público amplio y ser utilizada para cursos sobre las materias mencionadas.

Las tres partes de la obra están claramente diferenciadas. La primera se dedica a la fundamentación, y responde al hecho de que la actividad científica y la tecnológica son actividades humanas que, si bien poseen una autonomía propia, remiten al contexto global de la vida humana, con la consiguiente referencia al bien y al mal. Se consideran diversas concepciones de la ética y se señala como un peligro el cientificismo que relega lo ético al plano puramente emocional y subjetivo. Se estudia la racionalidad de la ética, fundada en el sujeto humano y en su dignidad como persona, apuntando al criterio ético según el cual el bien y el mal están en función de la promoción o destrucción de la dignidad humana. De ahí surge la necesidad del respeto a la vida humana, que se considera como un bien en sí y nunca como un medio: la categoría básica que rige en este ámbito es el respeto, frente a la manipulación. Se señala que esto no implica dejar las cosas tal como están, ya que tenemos una capacidad creadora: respeto no equivale a pasividad. Pero simultáneamente se desmitifica la contraposición entre persona y naturaleza, mostrando que la persona, si no se acepta su base natural, queda reducida a una idea abstracta que, en ocasiones, ha servido para justificar todo tipo de manipulaciones y abusos. La dignidad de la persona no se concibe como limitación, sino como cauce del auténtico progreso científico y técnico.

Respecto a la segunda parte, dedicada a la ética del conocimiento científico, debe señalarse el gran interés de los temas tratados, que giran en torno a la verdad científica. Se analiza de modo crítico el desplazamiento de la metafísica y la ética en nombre de la ciencia, que en ocasiones se extrapola injustificadamente como si fuese una nueva metafísica, sobrepasando las posibilidades de su método. Se trata de modo explícito el problema de la fiabilidad de la ciencia, que es, sin duda, un problema fundamental de nuestra época, dedicando al tema un capítulo entero. Se subraya que todo el trabajo científico está presidido por la noción de verdad, y se estudia la difícil pero importante noción de verdad científica.

La tercera parte contiene los temas más específicos y principales de la obra. Abarca 15 capítulos en los que se estudia la ambivalencia de la técnica, la ética de la investigación científica, la relación del hombre con la naturaleza, el valor de la vida biológica, la sexualidad humana, la experimentación científica en el hombre, la experimentación en fetos humanos, la manipulación genética por transferencia de genes, la tecnología genética aplicada al hom-

bre, la eugenesia, la manipulación del patrimonio genético con fines eugenésicos, las manipulaciones de la reproducción humana, la población ante los recursos naturales, las investigaciones con fines bélicos, la crisis energética y la experimentación en animales. No voy a entrar en más detalles, ya que cada uno de estos temas tiene una entidad propia. En definitiva, en esta obra se estudian con rigor y se exponen con claridad los temas más importantes que la ciencia en general y la biología en particular plantean a nuestra sociedad. Se trata de cuestiones vivas, no siempre bien conocidas, y esta obra proporciona una valiosa ayuda a cuantos estén interesados en ellas. (M. A.)

La teoria atomica y la descripcion de la naturaleza, por Niels Bohr. Prólogo, traducción y notas de M. Ferrero Melgar. Alianza Universidad; Madrid, 1988. **Fisica cuantica: ¿Ilusion o realidad?** por Alastair Rae. Traducción de M. Ferrero Melgar. Alianza Universidad; Madrid, 1988.

En los últimos años ha aparecido en castellano un apreciable número de libros de divulgación (algunos de gran altura) sobre los problemas, digamos filosóficos, de la teoría cuántica. De ellos, los más recientes son probablemente los dos aquí comentados.

Resulta difícil exponer breve y precisamente el problema "filosófico" fundamental de la mecánica cuántica. (Las comillas pretenden indicar que para bastantes científicos, incluyendo a Einstein, el problema no es estrictamente filosófico, sino que principalmente compete a la física.) En resumen, puede decirse que la mecánica cuántica es incompatible al menos con una de las dos afirmaciones siguientes:

1. Existe una realidad física, de la que nosotros formamos parte, que es objetiva, en el sentido de que los sucesos elementales, es decir, que ocurren a escala atómica (o subatómica), tienen existencia independientemente de cualquier acto de observación y las correspondientes entidades elementales, que constituyen en última instancia dicha realidad, poseen propiedades intrínsecas, independientes del sujeto.

2. La realidad física es separable. En otros términos, un suceso dado no puede influir en cualquier otro separado espacialmente (en el sentido de la relatividad) del primero. En cierto sentido, esto es equivalente a negar la posibilidad de propagación de señales o influencias a velocidades superlumínicas.

El conocido indeterminismo cuántico está íntimamente relacionado con los dos puntos anteriores. Sin embargo, cuando se hace énfasis en el aspecto no determinista de la teoría cuántica para distinguirla de la llamada física clásica, a veces se olvida que el determinismo de esta última suele tener un sentido puramente académico, salvo en sistemas "simples" (como la mayoría de los astronómicos en primera aproximación). El sentido más profundo del indeterminismo cuántico está contenido en el punto 1: en general, las propiedades de los sistemas microscópicos dependen últimamente del acto de observación.

En virtud de lo dicho hasta ahora puede quizás intuirse la extraña naturaleza de la realidad física que comporta la mecánica cuántica. Este es el motivo fundamental por el que Einstein, Schrödinger, De Broglie, Bohm y otros prestigiosos físicos (ciertamente con matices diferenciadores entre ellos) han asegurado que la teoría cuántica no puede constituir la última palabra y que sus aspectos indeterministas (o de dependencia del observador) se deben, en definitiva, a su carácter de teoría aproximada; la teoría más "profunda" subyacente sería determinista (al menos formalmente) y objetiva. (No obstante, hoy sabemos, a partir sobre todo de los experimentos de Aspect, que dicha teoría, de existir, habría de ser necesariamente no-local.) Por lo tanto, esta postura implica que el llamado problema de interpretación de la teoría cuántica es ante todo físico: debe buscarse una teoría más "universal", y en ella dicho problema sería irrelevante.

Por otro lado, los partidarios de la llamada línea "ortodoxa" se declaran satisfechos desde el punto de vista físico de la teoría cuántica, si bien algunos de ellos llegan a admitir la existencia de problemas de tipo epistemológico. En cualquier caso, sus declaraciones son más o menos del tenor siguiente: "Bueno, tal vez exista algún problema de tipo filosófico en la teoría cuántica; muy bien, que se les arreglen los filósofos entonces, pues como físicos nada tenemos que decir".

Se considera con razón que el debate en profundidad sobre la teoría cuántica se originó con la famosa discusión entre Bohr (padre de la escuela "ortodoxa") y Einstein, que tuvo lugar en el congreso Solvay de 1927 (y que continuó prácticamente hasta el fallecimiento de Einstein en 1955). La postura de Bohr en este debate es a veces (¿deliberadamente?) ambigua; en cualquier caso,

donde mejor viene reflejada es en tres de sus libros, los tres traducidos al castellano: *Ensayos sobre física atómica y conocimiento humano* y *Nuevos ensayos...*, ambos editados por la casa Aguilar, y el libro aquí comentado. Este último contiene cuatro ensayos escritos por Bohr entre 1925 y 1929, que es justamente un período de auténtica ebullición para la teoría cuántica: principio de indeterminación (Heisenberg, 1925), mecánica ondulatoria (Schrödinger, 1926), mecánica cuántica matricial (Born, Heisenberg y Jordan, 1926) y teoría de la transformación (Dirac, 1926-27); a los que habría que añadir tal vez la dualidad onda-partícula (De Broglie, 1924) y la estadística cuántica (Bose y Einstein, 1924-25).

Además de los ensayos mencionados, el libro contiene una interesante introducción del mismo Bohr, fechada en 1929, donde se resumen sus ideas y se aclaran ciertos puntos algo oscuros que aparecen en dichos ensayos. El libro se completa con un prólogo y unas notas de Miguel Ferrero, que ha hecho un loable esfuerzo para introducir al lector en el mundo "bohriano". A él se debe también la traducción, correcta en líneas generales.

Si el libro anterior expone las ideas de Bohr acerca de la teoría cuántica, el de Rae constituye una excelente introducción al planteamiento global del problema cuántico y a las diferentes soluciones propuestas del mismo. Quizá desde 1929, año en que Bohr escribió la introducción mencionada más arriba, hasta la fecha, la contribución más significativa al debate cuántico sea la debida a John Bell, que encontró en 1964 ciertas desigualdades (desde entonces llevan su nombre) que deben satisfacerse en toda teoría local (o separable) y realista y que a veces se violan en la mecánica cuántica. Estas desigualdades, convenientemente refinadas desde un punto de vista técnico, son susceptibles de verificación experimental. Y esto es lo que se ha hecho en repetidas ocasiones, mediante experimentos de diversos tipos, de los cuales los más espectaculares fueron llevados a cabo por Alain Aspect y colaboradores en París, en 1981-82, confirmando, casi sin lugar a dudas, los aspectos no-separables de la realidad física, en puntual acuerdo con la mecánica cuántica. Todo esto aparece claramente descrito en el libro, junto a una muy ilustrativa introducción de las propiedades físicas de los fotones relevantes para este tipo de experimentos. Se discuten además diversas salidas no ortodoxas del "impasse" cuántico que gozan de cierta popularidad entre la comunidad científica: influencia de la mente en el proceso de reducción del paquete de ondas; teoría de los muchos universos, aparentemente peregrina, pero que cada día gana más adeptos entre los cosmólogos; y, por último, ruptura de la coherencia cuántica cuando aumenta el grado de complejidad dinámica del sistema, idea esta última que está a punto de poder ser comprobada experimentalmente.

En cuanto a la traducción, debida también a M. Ferrero, es correcta en general y ajustada al texto original. Sólo un reparo: en la página 153 aparece una N. del T. criticando una afirmación del autor sobre los modelos de variables ocultas. Independientemente de quien tenga razón, el procedimiento seguido por el traductor no parece el más adecuado (*Traduttore, non traditore neppure correttore*).

En relación con la polémica Bohr-Einstein, la siguiente afirmación de este último resulta pertinente: *Die Natur verbirgt ihr Geheimnis durch die Erhabenheit ihres Wesens, aber nicht durch List* (la naturaleza oculta su secreto por la sublimidad de sus entes, pero no por astucia). Los lectores de los libros aquí comentados, y en particular los del libro de Rae, probablemente llegarán a estar en desacuerdo con Einstein; la naturaleza tal vez no sea sublime, pero sin duda alguna es astuta. (J. L. S.)

NONEQUILIBRIUM PHASE TRANSITIONS IN SEMICONDUCTORS, por E. Scholl. Springer-Verlag; Berlín, 1987.

Uno de los campos de investigación con más futuro, no sólo dentro de las llamadas ciencias experimentales, como la física y la química, sino en disciplinas tan aparentemente dispares y alejadas como son la economía, sociología, ecología, evolución, etc., es el de los sistemas dinámicos no lineales. Frente a la indudable monotonía de los sistemas lineales, la asombrosa variedad y riqueza de comportamiento de los sistemas no lineales abre un mundo nuevo en multitud de disciplinas y promete, en algunos casos, modificar nuestra propia concepción filosófica de lo que nos rodea. (El cambio de estructura mental impuesto por el descubrimiento de comportamientos caóticos en sistemas regidos por leyes de evolución determinista es un buen ejemplo.)

Como en todo campo de investigación relativamente nuevo, el estudio de sistemas reales (que se pueden encontrar en un laboratorio, por ejemplo) va

de la mano con el análisis de modelos sencillos con poca o nula relación con el mundo real. Aun cuando la utilidad de tales modelos sencillos es indudable –poco habríamos avanzado sin ellos– para interpretar correctamente los comportamientos observados en los sistemas reales, conviene no perder de vista la obligada artificialidad de algunos de ellos.

Por este motivo, es de agradecer la aparición de trabajos, como el libro que nos ocupa, que tratan de aplicar ideas y métodos modernos para explicar o predecir resultados que tienen una base experimental bien contrastada o pueden verificarse en el laboratorio.

El libro de Scholl analiza las distintas propiedades de los semiconductores debidas a una de sus principales características: a saber: la respuesta no lineal, es decir, no proporcional, del flujo de corriente al campo eléctrico externo aplicado.

La importancia práctica del tema es evidente. Es posible que la palabra semiconductor no le evoque nada a mucha gente; pero si decimos transistor (descubierto en 1948 por Bardeen, Brattain y Shockley y formado por material semiconductor), todo el mundo sería capaz de señalar algún objeto cercano que tuviera al transistor (y por consiguiente a los semiconductores) como componente esencial. Como su nombre indica, los semiconductores, los ejemplos más representativos serían los elementos germanio y silicio, presentan una resistencia al paso de corriente intermedia entre los metales y los aislantes. Una de las ventajas de estos materiales es que transmiten corrientes relativamente débiles y que pueden ser controladas con gran precisión. Esta y otras propiedades han hecho que en la actualidad la variedad de aplicaciones de los semiconductores sea inmensa: desde el receptor doméstico hasta los grandes supercomputadores, pasando por las células solares y los láseres de material semiconductor utilizados para generar pulsos ultracortos de utilidad en la comunicación óptica.

En el libro, el autor relaciona teoría y experimento y, aun cuando no siempre el resultado es satisfactorio, merece reseñarse su empeño. En el capítulo 1 se presenta, de forma amplia, el propósito y contenido de la obra, cuyas ideas centrales son considerar el semiconductor un sistema dinámico muy alejado del equilibrio termodinámico, regido por leyes de evolución no lineales, buscar la analogía con las transiciones de fase fuera del equilibrio y usar los métodos desarrollados en este campo, tan fructíferamente aplicados en otras disciplinas. Sabido es que los semiconductores presentan, bajo determinadas condiciones, una región en el diagrama de la densidad de corriente en función del campo eléctrico que corresponde a una conductividad diferencial (la pendiente de la curva) negativa. Para analizar las consecuencias de este hecho, el autor propone estudiar una serie de modelos en los que las leyes de evolución vienen determinadas por procesos de generación y recombinación (procesos *g-r*) de portadores de carga, electrones y huecos (espacios vacíos dejados por los electrones al ser excitados y que pueden considerarse cargas positivas). Los términos (no lineales) en las ecuaciones de transporte a que dan lugar los distintos procesos *g-r* se deducen de forma fenomenológica. (Aunque se le ofrece al lector la bibliografía pertinente, hubiera sido conveniente que se hubiera presentado cómo y bajo qué condiciones las expresiones fenomenológicas pueden obtenerse de los primeros principios.) El análisis a lo largo de todo el libro es determinista, es decir, no se consideran efectos causados por las fluctuaciones. Se trata de un punto importante, pues el menguado tamaño de los modernos aparatos construidos de semiconductores (en microelectrónica, por ejemplo), lo mismo que su extremada sensibilidad ante pequeños cambios en la temperatura, permiten predecir que los efectos estocásticos pueden ser importantes. Sin embargo, el autor despacha el tema en ocho líneas, remitiendo al lector a varios textos generales sobre procesos estocásticos en los cuales, tan sólo en uno, y de paso, se mencionan los semiconductores.

En el capítulo 2 se introducen modelos específicos para un portador de carga, electrón o hueco, dos portadores, electrón y hueco, y procesos *g-r* con excitones, electrón más hueco; analiza las soluciones estacionarias homogéneas, independientes del tiempo y de las dimensiones espaciales del sistema, de las ecuaciones de transporte. El trabajo permite familiarizarse con los conceptos y métodos; la semejanza con las transiciones de fase de no equilibrio, tanto de primero como de segundo orden, es manifiesta.

Se ocupa luego de la estabilidad de las soluciones estacionarias anteriormente calculadas frente a perturbaciones espacio-temporales, para el caso de un único portador de carga. Se obtienen condiciones para las que el estado estacionario de partida se hace inestable, lo que da lugar a fenómenos de bifurcación con la aparición de nuevas soluciones. No favorece la necesaria claridad que el autor aluda a la estabilidad de las soluciones estacionarias frente a fluctuaciones. Las fluctuaciones, de cuya importancia nos hemos hecho eco, pueden evolucionar con su propia dinámica, independientemente del sistema en consideración, mientras que las perturbaciones siempre evolucionan con la dinámica del propio sistema. Sería más correcto hablar de estabilidad frente a perturbaciones.

Los capítulos 4 y 5 se dedican a la aparición de soluciones estacionarias inhomogéneas, con dependencia espacial (las llamadas estructuras disipativas), para modelos de uno y dos portadores, y su estabilidad. Después de analizar el caso de un medio infinito, aborda la influencia de las condiciones de contorno en la estabilidad de las soluciones. Puesto que los sistemas van a ser finitos, y, en este campo, pequeños, el tema reviste un interés crucial, pues no olvidemos que la estructura espacial dependerá de las condiciones de contorno impuestas. De entre los interesantes resultados de estos dos capítulos destaca la aparición, bajo determinadas condiciones, de dos ciclos de histéresis en el mismo diagrama intensidad-voltaje, lo que permite explicar algunos resultados experimentales obtenidos para el arseniuro de galio a baja temperatura.

El capítulo 6 describe las soluciones dependientes del tiempo de las ecuaciones de transporte, especialmente la aparición de oscilaciones sostenidas y de comportamientos caóticos. En el primer caso se pasa revista a los mecanismos físicos que pueden producir tales oscilaciones sostenidas, y se analizan algunos modelos teóricos que presentan tales comportamientos. Respecto a la aparición de soluciones caóticas, expone un buen número de experimentos recientes, con diferentes materiales semiconductores, temperaturas, concentración de impurezas, voltajes aplicados, etc., en los que se observa una evolución caótica de la intensidad de corriente medida. En este dominio el experimento va muy por delante de la teoría. Así, en la gran mayoría de los casos no existe explicación teórica convincente, aunque el autor presenta un modelo que parece justificar alguna de las observaciones experimentales. (F. J. R.)